



Production et devenir du carbone organique fossile libéré par les altérations mécaniques et chimiques des formations marneuses : exemple des “ terres noires ” des bassins versants expérimentaux de Draix (Alpes de Haute Provence, France).

Yann Graz

► **To cite this version:**

Yann Graz. Production et devenir du carbone organique fossile libéré par les altérations mécaniques et chimiques des formations marneuses : exemple des “ terres noires ” des bassins versants expérimentaux de Draix (Alpes de Haute Provence, France).. Géochimie. Université d'Orléans, 2009. Français. NNT : . tel-00426401

HAL Id: tel-00426401

<https://theses.hal.science/tel-00426401>

Submitted on 26 Oct 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
LABORATOIRE : Institut des Sciences de la Terre d'Orléans

THÈSE présentée par : **Yann GRAZ**

soutenue le : **19 juin 2009**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : **Sciences de la Terre et de l'Atmosphère**

**Production et devenir du carbone organique fossile libéré par les altérations
mécaniques et chimiques des formations marneuses : exemple des « terres noires »
des bassins versants expérimentaux de Draix (Alpes de Haute Provence, France)**

THÈSE dirigée par :

M. Christian DI GIOVANNI

Professeur, Université d'Orléans,

RAPPORTEURS :

M. François BAUDIN

Professeur, Université Paris 6

M. Jérôme GAILLARDET

Professeur, Institut de Physique du Globe de Paris

JURY

M. Serge BERNE

Professeur, Université de Perpignan

M. Ary BRUAND

Professeur, Université d'Orléans

M. François BAUDIN

Professeur, Université Paris 6

M. Christian DI GIOVANNI

Professeur, Université d'Orléans,

M. Jérôme GAILLARDET

Professeur, Institut de Physique du Globe de Paris

Mme Nicole MATHYS

Ingénieur, Cemagref Grenoble

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à ceux et à celles qui ont contribué à son aboutissement

Je souhaite tout d'abord remercier mon directeur de thèse, Christian Di-Giovanni, pour son soutien, son (immense) patience, son aide et ses précieux conseils. Merci à lui pour le temps et l'énergie qu'il m'a consacré ainsi que pour tout ce qu'il m'a appris durant ces années.

Je remercie également J. Gaillardet, F. Baudin, A. Bruand, N. Mathys et S. Berne pour avoir accepté de rapporter ou examiner ce travail, et pour l'intérêt qu'ils y ont porté. Merci à eux pour leurs remarques et critiques constructives qui ont permis de faire avancer cette étude.

Un grand merci à tous ceux sans qui ce travail de longue haleine eut été impossible, ou au mieux réduit à peau de chagrin.

Je citerai donc toutes les personnes qui ont été sollicitées durant cette thèse :

- Au sein de l'ISTO (Orléans), je remercie P. Alberic, J.R. Disnar, F. Laggoun Defarge, M. Boussafir, D. Kéravis, M. Hatton, F. Muller, J. Jacob, R. Boscardin, P. Baillif, X. Bourrat, S. Sizaret, J.L. Rouet et E. Chapron pour leurs aides et expertises.
- Au M2C (Rouen), je remercie Y. Copard pour son expertise et ses encouragements.
- Au G2R (Nancy), je remercie P. Faure, R. Michels et M. Elie pour les analyses moléculaires.
- Au MGS (INRA-Université de Bourgogne), je remercie J. Lévêque pour les analyses isotopiques.
- A l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, pour les échantillons de particules fluviales du Rhône.

Un immense merci à l'ensemble des membres du GIS DRAIX « Bassins de Draix, mesure de l'érosion de montagne », particulièrement à N. Mathys, J.E. Olivier, S. Klotz et F. Rey pour la quantité, et qualité, des données existantes concernant les sites étudiés. Ces dernières, uniques, ont été indispensables à ce travail.

Je remercie l'ensemble des personnes qui ont fait que ces années se sont agréablement écoulées : Pierre, Jeremy, Ronald, Mat, Fred, Paul, Mathieu, Homan, Priscille, Manu, Fabrice, Giada, Fet, Edith, Seb, Khalifa, Mourad, Nicolas, Aurore, Manue, Audrey, Sylvain, David, Marlène, Camille, Lucile, Jérôme, Max, Laure, Aida, Marion, Marcio, François, Marina, Remi, Caro, Lucas, Ben, Frisoute, Mèche, Yolaine, Anaëlle, Michael, Choubi, Chantal, Marie-Noëlle, Nathalie, Fabienne...

Ce travail a été financé par le ministère de la recherche, que je remercie. Je veux aussi témoigner ma gratitude à l'ISTO pour le financement des durs derniers mois et plus particulièrement F. Laggoun Defarge, P. Gautret et E. Lallier-Verges.

Pour finir, de gros mercis à mes parents et à mon frère pour leur soutien et leurs encouragements.

Table des matières



<u>Introduction : la question posée</u>	11
<u>Chapitre I : Le carbone organique fossile : état des lieux et positionnement stratégique</u>	17
A) Etat des lieux: rappels sur le cycle du carbone	20
A-1) Le carbone organique fossile, formation et rôle dans le cycle du carbone	20
A-1-1) Le cycle du carbone actuel	22
A-1-2) Cycle du carbone, de l'Archéen au Phanérozoïque	22
A-2) Le devenir du carbone organique fossile : minéralisation totale lors de sa libération ?	26
A-3) Le devenir du carbone organique fossile : résistance face aux altérations supergènes ?	27
A-3-1) Les études mono-compartiment, mono-analytique	27
A-3-2) Les études mono-compartiment, pluri-analytiques	29
A-3-3) Les études pluri-compartiments, mono-analytique	34
A-3-4) Les études pluri-compartiments, pluri-analytiques	35
A-3-5) Estimations de la minéralisation de COF	38
A-3-6) Les études globales	39
B) Bilan et stratégie	42
<u>Chapitre II : Choix du site d'étude, échantillonnage, et présentation des méthodes analytiques</u>	47
A) Site d'étude : les bassins versants de Draix	49
A-1) Le bassin versant de la Durance	51
A-2) Les bassins versants expérimentaux de Draix	51
A-2-1) Historique des bassins versants	51
A-2-2) Climat	53
A-2-3) Contexte géologique	54
A-3) Caractéristiques géomorphologiques des bassins versants	56
A-3-1) Le Laval	56
A-3-2) Le Brusquet	57
A-3-3) Le Moulin	59
A-3-4) La Roubine	61
A-4) Equipement existant et mesures effectuées	62
B) Echantillonnage	64
B-1) Bassin versant du Laval	65
B-1-1) Les profils de sols	65
B-1-2) Les profils d'altération	66
B-1-3) Les particules fluviales	71
B-1-4) Autres échantillons	71
B-2) Bassin versant du Brusquet	72
B-2-1) Les profils de sols	72
B-2-2) Les profils d'altération	73
B-2-3) Les particules fluviales	77
B-2-4) Autres échantillons	77
B-3) Bassin versant du Moulin	78
C) Analyses conduites	79
C-1) Les méthodes optiques	79
C-1-1) Le palynofacies	79
C-1-2) Mesure du pouvoir réflecteur	80
C-2) Les méthodes géochimiques	81
C-2-1) La pyrolyse rock-Eval	81
C-2-2) Le rapport C / N	84
C-3) Les méthodes isotopiques	85
C-3-1) $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$	85
C-3-2) Âges radiocarbone	86
C-4) Les méthodes moléculaires	87
C-5) Spectrométrie d'émission Plasma à Couplage Inductif (ICP-OES)	88
C-6) Conclusion	88

Chapitre III : Mise en évidence de la contribution en COF dans les compartiments étudiés	91
A) Etude préliminaire concernant la matrice observée au sein des concentrés organiques (palynofacies)	94
A-1) Microscopie Electronique en Transmission (MET)	95
A-2) Rayons X	98
A-3) La pyrolyse Rock-Eval	99
A-4) Conclusion	100
B) Mise en évidence de la contribution en carbone organique fossile dans les compartiments étudiés : résultats mission 2001	101
C) Mise en évidence de la contribution en carbone organique fossile dans les compartiments étudiés : résultats mission 2006	129
C-1) Analyse optique (Palynofacies)	129
C-1-1) Particules observées	129
C-1-2) Echantillons du bassin versant du Laval	139
C-1-3) Echantillons du bassin versant du Brusquet	144
C-1-4) Echantillons du bassin versant du Moulin	151
C-2) Mesure du pouvoir réflecteur	152
C-2-1) Bassin versant du Laval	152
C-2-2) Bassin versant du Brusquet	155
C-3) Pyrolyse Rock-Eval	159
C-3-1) Bassin versant du Laval	159
C-3-2) Bassin versant du Brusquet	165
C-3-3) Bassin versant du Moulin	171
C-4) Analyse ICP	173
C-4-1) Bassin versant du Laval	173
C-4-2) Bassin versant du Brusquet	176
C-4-3) Bassin versant du Moulin	178
D) Bilan	179
D-1) Définition de MOR et MOF et pertinence des analyses	179
D-1-1) Analyses optiques	179
D-1-2) Pyrolyse Rock-Eval	182
D-1-3) Les analyses élémentaires et isotopiques	184
D-1-4) Analyses moléculaires	184
D-1-5) Pertinence des analyses dans le cas de mélanges MOF / MOR	185
D-2) Suivi de la contribution fossile dans les compartiments étudiés	187
D-2-1) Le compartiment altérites, échantillons PL	187
D-2-2) Le compartiment altérites, échantillons TF	188
D-2-3) Le compartiment sol, échantillons d'horizons A	189
D-2-4) Le compartiment particules fluviales	189
E) Conclusion	191
 Chapitre IV : Comportement de la MOF face aux altérations supergènes	 193
A) Quantification de la contribution et des pertes de MOF au sein des compartiments	196
A-1) Développement d'une nouvelle méthode de quantification : le palynofacies quantitatif	196
A-1-1) Préparation des concentrés organiques et incorporation du standard	197
A-1-2) Mesure de la densité des particules	197
A-1-3) Estimation des % massiques des particules	201
A-2) Résultats : bassin versant du Laval.	202
A-3) Résultats : bassin versant du Brusquet	234
A-3-1) Résultats de l'analyse ICP normés aux % Al ₂ O ₃	234
A-3-2) Palynofacies quantitatif	238
A-4) Résultats : bassin versant du Moulin	249
A-4-1) Résultats de l'analyse ICP normés aux % Al ₂ O ₃	249
A-4-2) Palynofacies quantitatif	249
A-5) Bilan	250
A-5-1) le palynofacies quantitatif : apports, précisions et limites	250
A-5-2) Validation des compartiments Roches, Altérites Sols et Particules fluviales	253
A-5-3) Pertes en MOF lors des transferts entre compartiments	257
A-5-4) Evolution de la MOR	259
A-6) Conclusion	260

B) Dégradations expérimentales de la matière organique	262
B-1) Protocoles expérimentaux	263
B-1-1) Dégradation bactérienne	263
B-1-2) Oxydation	263
B-1-3) Hydrolyse	263
B-2) Résultats des dégradations expérimentales de la MOF	265
B-2-1) Dégradation bactérienne	265
B-2-2) Oxydation	272
B-2-3) Hydrolyse	275
B-3) Résultats des dégradations expérimentales de la MOR	278
B-3-1) Dégradation bactérienne	278
B-3-2) Oxydation	283
B-3-3) Hydrolyse	286
B-4) Bilan des dégradations expérimentales	289
B-4-1) Cas de la MOF	289
B-4-2) Cas de la MOR	297
B-5) Conclusion	303
B-5-1) Dégradation de la MOR	303
B-5-2) Dégradation de la MOF	305
C) Confrontation des données obtenues sur le terrain et par expérimentation	307
C-1) Cas de la MOR	307
C-2) Cas de la MOF	308
C-2-1) Pertes globales et transformations potentielles de la MOF	308
C-2-2) Altérations « in situ » versus altérations expérimentales	309
C-2-3) Devenir de la MOF lors des transferts entre compartiments	312
D) Conclusion	314
 Chapitre V : Flux de COF libéré par les altérations supergènes	 317
A) Flux de COF à l'échelle des bassins versants	319
A-1) Les flux de COF libéré par l'altération mécanique	319
A-1-1) Les chroniques d'exports solides aux exutoires des bassins	319
A-1-2) Le contenu en Corg des particules fluviales	321
A-1-3) Les FmCOF	327
A-2) Les flux de COF libéré par l'altération chimique	328
A-2-1) Masses annuelles de roche altérée	328
A-2-2) Les FcCOF	331
A-3) Confrontation entre flux et facteurs contrôlant	332
A-3-1) Les facteurs contrôlant	332
A-3-2) Facteurs simples retenus	333
A-3-3) Influences des facteurs sur les FmCOF	335
A-4) Conclusion	339
B) Modélisations des flux de COF	340
B-1) Stratégie de modélisation	340
B-2) Modélisations des FmCOF	340
B-2-1) Modélisations des FmCOF selon les facteurs Tn, Pt et Pre	340
B-2-2) Modélisations simplifiées des FmCOF	348
B-2-3) Test des modèles sur d'autres sites	354
B-3) Modélisations des FcCOF	360
B-3-1) Modélisations des FcCOF selon les facteurs Tn, Pt et Pre	360
B-3-2) Modélisations simplifiées des FcCOF	367
B-3-3) Evaluation des impacts des facteurs Tn et Pt sur les FcCOF – modélisation autres sites	372
B-4) Conclusion	377

C) Applications des modélisations	378
C-1) Evolution des flux de COF depuis 200 ans	378
C-1-1) Evolution des facteurs contrôlant	378
C-1-2) Evolution des FmCOF	382
C-1-3) Evolution des FcCOF	385
C-1-4) Impact de l'anthropisation sur l'évolution des flux de COF	388
C-2) Les flux de COF à l'échelle régionale	390
C-2-1) Approche « amont »	390
C-2-2) Approche « aval »	391
C-2-3) Les flux de COF issus de l'érosion des terres noires à l'échelle régionale	392
C-2-4) Prise en compte des autres types de marnes du bassin de la Durance	396
C-3) Conclusion	398
D) Conclusion	399
 <u>Chapitre VI : Synthèse</u>	 401
A) Enseignements sur la MOF délivrée par les terres noires des bassins de Draix	403
A-1) Nature et dégradabilité de la MOF	403
A-2) Bilans actuels de MOF / COF dans les bassins de Draix	404
A-2-1) Contribution massive en MOF dans les compartiments étudiés	404
A-2-2) Flux et stockages annuels de COF	406
A-2-3) L'effet des paramètres géomorphologiques et de l'anthropisation sur les flux de COF	408
A-3) Flux de COF et de COR	410
A-3-1) Estimation des flux et stocks de COF depuis 1800	410
A-3-2) Estimation des flux et stocks de COR depuis 1800	411
A-3-3) Comparaison des flux et stocks de COF et COR depuis 1800	413
B) les enseignements extrapolables à d'autres études	416
B-1) Les apports du palynofacies quantitatif	416
B-2) Flux et devenir du COF libéré	417
B-2-1) Les flux de COF libéré	417
B-2-2) La dégradabilité différentielle des particules organiques	418
B-3) La datation des sédiments	419
C) Manques et perspectives	420
C-1) A l'échelle des bassins de Draix	420
C-2) Les autres types de bassins versants	420
C-3) Les flux de COF à l'échelle globale	421
 <u>Conclusion générale</u>	 423
<u>Références bibliographiques</u>	429
<u>Liste des figures</u>	441
<u>Liste des tableaux</u>	451
<u>Annexes</u>	455
<u>Abréviation, sigles et acronymes</u>	499

Introduction : la question posée

La vie telle que nous la connaissons sur Terre est rendue possible grâce à un équilibre subtil maintenu par différents paramètres physico-chimiques tels que la température moyenne régnant à la surface de la planète. Cette dernière est dépendante de l'effet de serre, lui-même fortement lié à la concentration atmosphérique en CO_2 ⁽¹⁾. La hausse de cette dernière depuis la révolution industrielle, passant de 280 ppm³ en 1800 à 360 ppm³ en 1995 puis 379 ppm³ en 2005 (Dedieu, 1997 ; IPCC, 1992, 2001, 2007), serait à l'origine d'un réchauffement climatique qui pourrait se traduire par une série de conséquences environnementales et humaines aujourd'hui encore mal connues, mais potentiellement inquiétantes (montée du niveau marin, déplacement des zones agricoles, IPCC, 2007). Aussi, de nombreuses études portent actuellement sur les inconnues qui subsistent dans cette évolution et sur ses conséquences possibles sur les sociétés humaines. Elles s'intéressent notamment aux mécanismes contrôlant les flux entre les différents réservoirs du cycle du carbone, c'est-à-dire l'atmosphère, la biosphère, la lithosphère, la pédosphère et l'hydrosphère.

Un premier bilan montre que l'activité humaine génère un bilan de CO_2 atmosphérique positif. Pour la période 1980-1989, la déforestation et la combustion du carbone fossile ont respectivement rejeté dans l'atmosphère 1 à 2,7 milliards de tonnes de carbone par an (GtC/an) (Houghton, 1991 ; 1998) et 5,4 à 6,6 GtC/an (Watson *et al*, 1990 ; Houghton, 1998), tandis que seulement 1,7 à 2,8 GtC/an environ ont été absorbées par les océans (Sarmiento et Sundquist, 1992). Le bilan entrée/sortie du réservoir atmosphère a ainsi été estimé entre +4,7 et +5,3 GtC/an. Ceci est toutefois à supérieur à la hausse réellement mesurée de 3,4 GtC/an au cours cette même décennie (Watson *et al*, 1990). Une quantité importante de carbone, de 1,3 à 1,9 GtC/an (Schimmel, 1994 ; Amiotte Suchet, 1995, Houghton, 1998), a donc disparu de l'atmosphère (le carbone manquant).

¹ Le CO_2 est opaque aux rayons infrarouges émis par la Terre. En absorbant ces rayonnements, il emprisonne l'énergie thermique et provoque ainsi un réchauffement de la basse atmosphère. Sans cet effet de serre, la température moyenne sur Terre serait de -20°C.

Les flux entre l'atmosphère, la biosphère, l'atmosphère et les océans ont été successivement évoqués pour expliquer ce manque, mais les paramètres contrôlant sont encore mal connus. L'hypothèse d'un accroissement des flux de carbone de l'atmosphère vers la biosphère en réponse à la hausse du CO₂ atmosphérique semble la mieux placée pour expliquer le carbone manquant, mais les modélisations et quantifications effectuées restent hasardeuses et ne permettent pas d'expliquer la totalité du phénomène (Tans, 1990 ; Dai *et al*, 1993 ; Harrisson *et al*, 1993 ; King *et al*, 1995 ; Kaufmann et Stock, 2003).

Il reste de plus une inconnue supplémentaire dans le cycle du carbone : le devenir du Carbone Organique Fossile (COF) libéré lors de l'altération des roches sédimentaires. De nombreuses estimations des stocks et flux de carbone organique (Corg), des, et entre, les différents compartiments du cycle du carbone ont été proposées (Holland, 1978 ; Adams *et al*, 1990, Degens *et al*, 1991 ; Probst, 1992 ; Eswaran *et al*, 1993; Amiotte Suchet, 1995 ; Balesdent, 1996 ; Batjes, 1996 ; Adams and Faure, 1996 ; Ludwig *et al*, 1996 ; Carter *et al*, 1997 ; Aitkenhead and McDowell, 2000), et aucune ne prend en compte la contribution possible de COF dans le cycle supergène. Ceci pour deux principales raisons.

Raison 1 - le COF est considéré comme dégradable et source de carbone pour l'atmosphère (Berner, 1989a,b; Berner et Maasch, 1996). En effet, un simple transit du COF sans minéralisation de la roche mère aux sédiments océaniques se traduirait par une diminution au cours du temps de la concentration en CO₂ atmosphérique, associée à une augmentation de la teneur en Corg de ces mêmes sédiments. Ceci n'est pas observé dans les séries géologiques.

Raison 2 - les roches sédimentaires à travers le monde contiennent, en moyenne, moins de 1% de COF (Ronov et Yaroshevskiy, 1976). Le poids de ce dernier face à la production primaire végétale récente (plusieurs t/ha/an, Duvignaud, 1980 ; Watson *et al*, 2000) peut donc être considéré comme négligeable.

Ces deux raisons classiquement évoquées trouvent cependant des contre-argumentaires appuyés par des travaux plus ou moins récents :

Contre-argumentaire - Raison 1 : la présence de COF, ou de carbone ancien, a de nombreuses fois été mise en évidence dans les compartiments suscités : -1) dans les rivières (Dow, 1977 ; Bilodeau *et al*, 1990, Di-Giovanni *et al*, 1994, 2000a ; Kao et Liu, 1996 ; Massiello et Druffel, 2001 ; Blair *et al*, 2003 ; 2004 ; Raymond et Bauer, 2001 ; 2004 ; Gomez *et al*, 2003 ; Komada *et al*, 2005 ; Copard *et al*, 2006 ; Leithold *et al*, 2006 ; Hilton *et al*, 2008) ; -2) dans les sols (Lichtfouse *et al*, 1997a,b ; Di Giovanni *et al*, 1998a,b ; 1999a,b ; 2000 ; Blair *et al*, 2003 ; Copard *et al*, 2006 ; Sebag *et al*, 2006) ou encore -3) dans les sédiments lacustres et marins (Groot *et al*, 1967 ; Groot et Groot, 1971 ; Combaz *et al*, 1974 ; Truswell et Drewry, 1984 ; Hart *et al*, 1994 ; Tyson, 1995 ; Di-Giovanni *et al*, 1997 ; 1999c ; Eglinton *et al*, 1997 ; Moran *et al*, 1998 ; Ludwig, 2001 ; Leithold et Blair, 2001 ; Blair *et al*, 2003 ; Wakeham *et al*, 2004 ; Dickens, 2004a,b, Nzoussi *et al*, 2005) . Ces constats, qui témoignent de la résistance potentielle, mais pas forcément totale du COF face aux altérations supergènes, s'opposent à la raison 1.

Contre-argumentaire - Raison 2 : Les rares estimations de stock ou flux de COF établies à l'échelle mondiale permettent de répondre à la raison 2. Le stock de COF contenu dans le 1^{er} mètre de roche à la surface du globe atteint 1000 Gt, et est directement comparable aux 1500 Gt de Corg contenues dans le 1^{er} mètre de sol (Copard *et al*, 2007). Par ailleurs, les fleuves et rivières actuels pourraient transporter entre 0,04 et 0,08 Gt/an de COF libéré par l'altération mécanique des roches (Meybeck, 1993 ; Blair *et al*, 2003 ; 2004), tandis que la seule érosion chimique des formations marneuses libérerait entre 0,04 et 0,09 Gt COF/an (Di-Giovanni *et al*, 2002, Copard *et al*, 2007). Ces flux sont de l'ordre de grandeur du flux de carbone organique total (COT) transporté par les fleuves et rivières sous forme particulaire, estimé entre 0,09 à 0,3 GtC/an (Berner, 1992 ; Amiotte-Suchet, 1995 ; Ludwig *et al*, 1996 ; Stallard, 1998 ; Schlunz et Scheider, 2000). Le « poids » du COF ne peut donc pas être considéré comme négligeable.

Les contre argumentaires que nous venons d'exposer montrent qu'il n'existe pas actuellement de consensus concernant la contribution du COF dans le cycle supergène. Celle-ci doit cependant être prise en compte et sa description passe par répondre à trois principaux champs de questions :

- Existe-t-il un seul type de COF ?
- En quelle quantité le COF est-il libéré lors de l'altération de sa roche mère ? Selon quelle modalité (altération mécanique – altération chimique) ?
- Quel est son devenir selon les diverses modalités de libération? Se minéralise-t-il et alimente-t-il l'atmosphère en CO₂ ? Contribue-t-il au stock de carbone contenu dans les sols, ou est-il transféré vers les océans par les rivières?

Avancer sur ces questions constitue l'objectif principal du travail exposé. Ceci nécessite plus concrètement de :

- 1- Savoir distinguer et caractériser le COF du carbone organique récent (COR) au sein des compartiments étudiés : roches, altérites, sols et particules fluviales ;
- 2- Savoir estimer la part de COF minéralisée, ou dissoute, lors des transferts entre ces compartiments ;
- 3- Savoir estimer des flux entre ces compartiments afin d'appréhender et de hiérarchiser les facteurs les contrôlant ;
- 4- Savoir modéliser ces flux afin d'établir des bilans à plus grandes échelles, mais aussi proposer des estimations d'évolutions temporelles.

Le présent travail sera organisé en chapitres successifs, pouvant être vus comme les étapes chronologiques que nous avons suivies, chacune s'appuyant sur les acquis des précédentes.

- Le premier chapitre (étape 1) consistera en un état des lieux des connaissances et incertitudes concernant le rôle du COF dans le cycle du carbone, ceci afin d'établir la stratégie de notre travail.
- Le deuxième chapitre (étape 2) justifiera le choix du site d'étude et présentera l'échantillonnage ainsi que les analyses conduites.
- Le troisième chapitre (étape 3) s'intéressera à la mise en évidence de la contribution organique fossile dans les compartiments étudiés.
- Le quatrième chapitre (étape 4) portera sur la quantification de la Matière Organique Fossile (MOF) au sein des compartiments étudiés et s'appuiera sur le développement d'une nouvelle méthode : le palynofacies quantitatif². Les données obtenues seront ensuite confrontées aux résultats d'altérations expérimentales (oxydation, hydrolyse et attaque bactérienne).
- Le cinquième chapitre (étape 5) présentera les bilans de flux de COF calculés à l'échelle des sites étudiés (échelle locale). Ces données seront utilisées pour leur modélisation en intégrant les paramètres simples que sont la végétation, la pente et les précipitations. Nous développerons ensuite deux applications de cette modélisation : -1) une proposition de l'évolution temporelle des flux sur les deux derniers siècles; ainsi -2) qu'un test de représentativité à l'échelle régionale.
- L'ensemble des résultats obtenus seront synthétisés dans le sixième et dernier chapitre.

² Cette méthode permet un suivi de la MOF lors de ses transferts entre les compartiments étudiés, et ainsi d'estimer des pertes.

Chapitre I

Le carbone organique fossile : état des lieux et positionnement stratégique



Où personne n'est parfaitement d'accord...

Le but de ce chapitre est de situer notre étude par rapport aux multiples travaux préalablement menés sur le sujet. La compréhension du débat concernant le devenir du COF suite à sa libération, nécessite dans un premier temps de positionner cet élément dans le cycle du carbone, et d'exposer son rôle dans la formation de l'atmosphère terrestre au cours des temps géologiques. Nous présenterons ensuite brièvement l'hypothèse de Berner (minéralisation du COF) avant de citer, et de discuter, quelques travaux soutenant un point de vue contraire (résistance, au moins partielle du COF aux altérations). Cette revue bibliographique nous permettra, in fine, de positionner notre stratégie.

A) Etat des lieux: rappels sur le cycle du carbone

A-1) Le carbone organique fossile, formation et rôle dans le cycle du carbone

A-1-1) Le cycle du carbone actuel

Les récents changements climatiques ont généré un intérêt sans précédent pour le cycle du carbone, conduisant la communauté scientifique à mieux contraindre les différents échanges de cet élément entre les compartiments atmosphère, hydrosphère, lithosphère et biosphère. Les nombreux travaux effectués, souvent synthétisés au sein de rapports tels ceux de « l'Intergovernmental Panel on Climate Change » (IPCC), ont permis de mieux comprendre le cycle actuel, présenté dans la figure I-1 (Kump, Kasting et Crane, 1999). Le plus grand réservoir de carbone est constitué par les roches sédimentaires (plus de 50.000.000 GtC) tandis que les océans représentent un second réservoir important (39.000 GtC). Comparativement, les réservoirs atmosphère et biosphère ne contiennent que peu de carbone (respectivement 760 et 610 GtC). Les flèches rouges représentent l'impact humain (déforestation, combustion de carbone fossile et fabrication de ciment) responsable de la hausse actuelle de CO₂ atmosphérique.

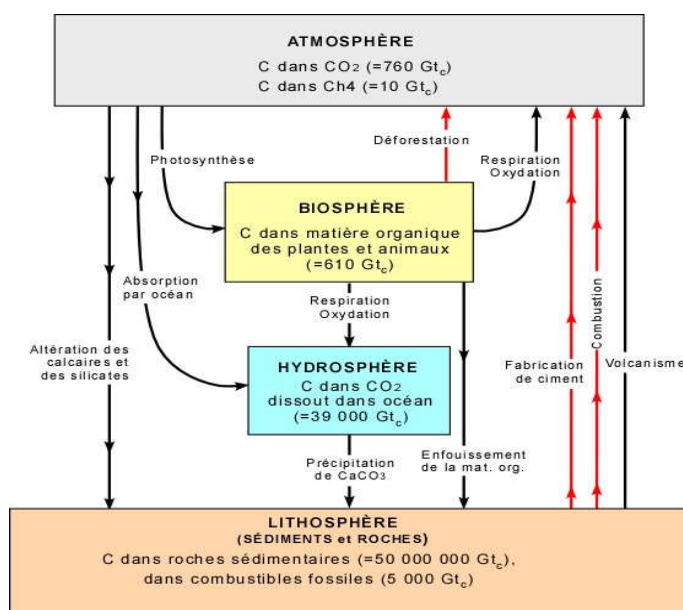
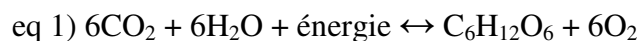


Figure I-1 : Le cycle global du carbone (Kump, Kasting et Crane, 1999).

L'étude du COF, et de son rôle dans le cycle du carbone passé et actuel, nous impose un rappel du cycle du carbone organique. Ce dernier, principalement formé lors de la synthèse de matière organique par photosynthèse (équation 1) représente un puits de carbone pour l'atmosphère (actuellement 60 GtC/an), passant vers le compartiment biosphère (morte et vivante, marine ou terrestre).



La respiration des végétaux (inverse de la photosynthèse) associée à la dégradation de la matière organique (oxydation, fermentation) vont cependant provoquer un retour rapide (à l'échelle des années/siècles) de ce carbone vers l'atmosphère (source) selon un flux actuel de 59,5 GtC/an environ (figure I-2, selon Kump, Kasting et Crane, 1999). La différence entre ce puits et cette source, généralement estimé entre 0,05GtC/an et 0,12 GtC/an (Schluntz and Shneider, 2000), correspond à l'enfouissement de Corg dans les sédiments et roches sédimentaires, échappant de fait à un premier « cycle court » du carbone pour un « cycle plus long ». Ce flux, très faible, est à pondérer par les temps de résidence de ce carbone dans la lithosphère, pouvant dépasser la centaine de millions d'années. Ce piégeage a ainsi permis, sur le long terme, la constitution du plus important réservoir de Corg, variant, selon les estimations, de 10.000.000 à 14.700.000 GtC (Amiotte-Zuchet., 1995 ; Kump, Kasting et Crane, 1999). Il a aussi autorisé le maintien dans l'atmosphère d'une part de l'O₂ produit lors de la photosynthèse.

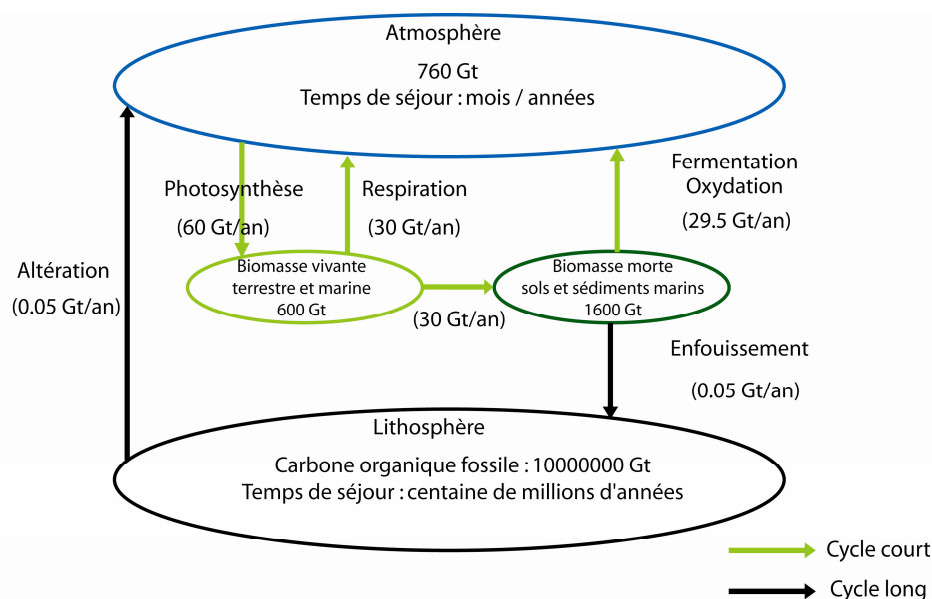


Figure I-2 : Le cycle du carbone organique (Kump, Kasting et Crane, 1999).

A-1-2) Cycle du carbone, de l'Archéen au Phanérozoïque

A-1-2-1) De l'Archéen au Protérozoïque

Le cycle du carbone n'a pas toujours fonctionné comme précédemment évoqué. L'atmosphère de la Terre a fortement évolué au cours des temps géologiques : principalement composée de CO₂, H₂O et N₂ il y a 4,4 milliard d'années (Kasting, 1993 ; 2004 ; Rotaru *et al*, 2006), elle est aujourd'hui essentiellement constituée de N₂ et d'O₂ (Figure I-3).

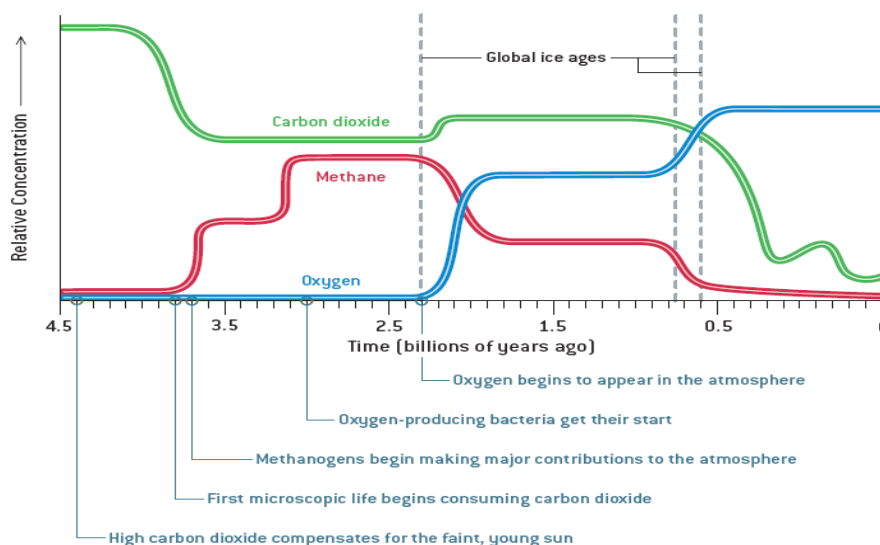
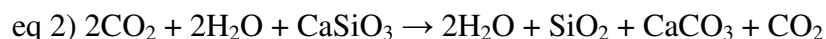


Figure I-3 : Evolution des concentrations atmosphériques en CO₂, O₂ et CH₄ au cours des temps géologiques (Kasting, 2004).

Sur cette période, nous retiendrons essentiellement une chute du CO₂ atmosphérique, passant de 95 % à 280 ppm (période préindustrielle). Cette chute, amorcée dès l'Archéen serait principalement due à des mécanismes tels que l'altération des roches silicatées, favorisant le transfert de carbone vers les océans, puis, la précipitation de carbonate (Lowe et Tice, 2004). L'équation 2 illustre ce phénomène à travers l'altération de la wollastonite (CaSiO₃).



Ce n'est que plus tardivement, entre 3,8 et 2,7 milliards d'années (Yamaguchi, 2003) qu'apparurent les premiers organismes utilisant la photosynthèse, les cyanobactéries, piégeant ainsi le CO₂ et libérant l'O₂ nécessaire à la vie.

A-1-2-2) Durant le Phanérozoïque

L'atmosphère terrestre devient proche de l'actuelle à partir du Phanérozoïque. La vie terrestre se développe (Fike *et al*, 2006) tandis qu'apparaissent les premières plantes vasculaires (Silurien – Dévonien, Raven, 1983). Le cycle du carbone tel que nous le concevons aujourd'hui est en place. En 1983, Berner, Lasaga et Garrels proposent un modèle, BLAG (Berner, LAsaga, Garrels), permettant d'estimer le taux de CO₂ atmosphérique depuis le Cambrien. Ce modèle tient compte des principaux puits et des principales sources de carbone pour l'atmosphère : métamorphisme / volcanisme (source de CO₂ pour l'atmosphère), altération des roches silicatées et carbonatées (puits de CO₂ pour l'atmosphère), précipitation de carbonates dans les océans (puits de CO₂ pour l'atmosphère) ainsi que taux d'enfouissement et / ou minéralisation de la matière organique (puits / source de CO₂ pour l'atmosphère). Berner a, par la suite, proposé de nouveaux modèles (GEOCARB, 1991 ; GEOCARB II, 1994 ; GEOCARB III, 2001 ; GEOCARBSULF, 2006), similaires au modèle BLAG sur le principe (figure I-4), mais améliorés dans la mesure où ils tiennent compte de l'évolution des connaissances scientifiques. Ces modèles intègrent par exemple l'influence de la tectonique³, ou encore l'influence de la végétation⁴ sur l'altération chimique...

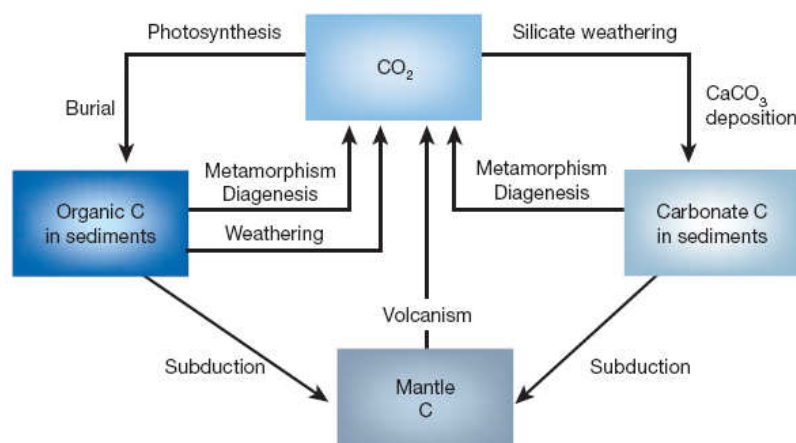


Figure I-4 : Représentation schématique des compartiments et flux pris en compte par les modèles GEOCARB (Berner, 2003a).

³ La tectonique a une influence sur le volcanisme (dégazage de CO₂), sur le métamorphisme, mais aussi sur la quantité de roche soumise à l'altération chimique (formation de reliefs ; bas ou haut niveau marin).

⁴ La végétation, notamment les végétaux supérieurs, favorise l'infiltration des eaux (racines) et, de fait, l'altération chimique des roches.

La figure I-5 présente les teneurs en CO₂ atmosphérique rapportées à l'actuel (RCO₂), modélisées selon les modèles GEOCARB II et III.

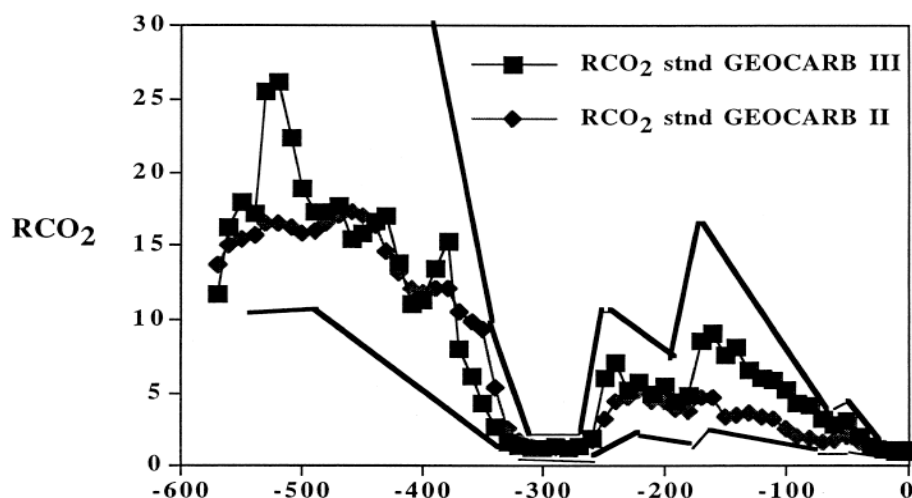


Figure I-5: Evolution des teneurs en CO₂ atmosphérique rapportées à l'actuel (RCO₂) durant le Phanérozoïque selon les modèles GEOCARB II et III. Les courbes en trait plein représentent l'incertitude des modèles (Berner, 2001).

L'examen de ces teneurs suggère deux commentaires :

-1) L'importante décroissance du RCO₂ située entre 500 et 300 millions d'années s'explique par l'apparition des plantes vasculaires sur la surface terrestre. Ces plantes favorisent la chute du CO₂ atmosphérique, -1) par formation de carbone organique ; -2) en favorisant l'altération chimique continentale par augmentation de l'infiltration. Cette chute est accentuée sur le long terme par l'enfouissement d'une part de la matière organique produite (Figure I-6, Berner, 1998 ; 2001 ; 2003b).

-2) Les teneurs atmosphériques actuelles CO₂ sont exceptionnellement basses. Cela s'explique par plusieurs mécanismes : -1) une nette diminution de l'activité tectonique au niveau des dorsales médio-océaniques depuis 80 millions d'années, provoquant une diminution du CO₂ dégazé ; -2) la surrection de l'Himalaya depuis 30 millions d'années favorisant l'altération chimique des roches ; -3) la succession de périodes glaciaires (Pléistocène) ayant favorisé les bas niveaux marins, offrant ainsi de grandes surfaces continentales à l'altération chimique.

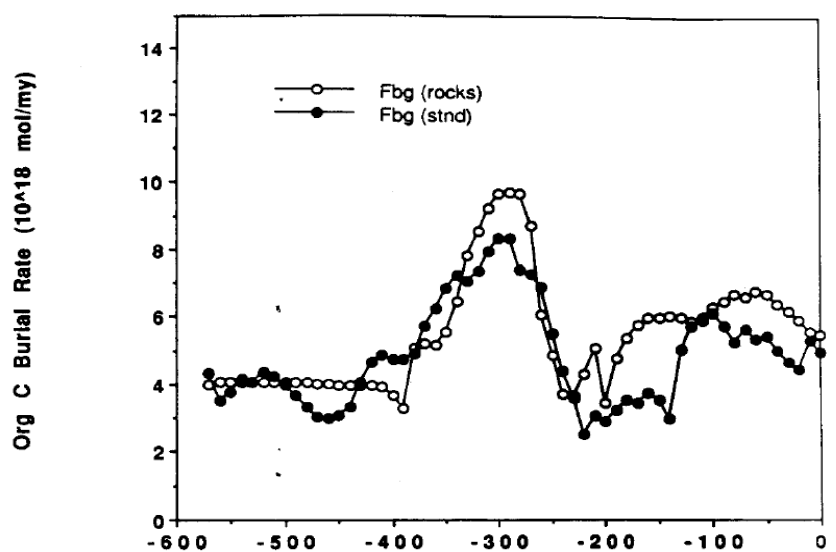


Figure I-6 : Taux d'enfouissement du carbone organique au cour du Phanérozoïque :

- estimation GEOCARB (noir).

- estimation à partir de la concentration en carbone organique des roches à travers le monde (blanc).
(Berner, 2001)

A-2) Le devenir du carbone organique fossile : minéralisation totale lors de sa libération ?

Pour intéressants qu'ils soient, les modèles établis par Berner intègrent le postulat que le COF se minéralise totalement suite à sa libération (Berner 1989 ; 1996). Deux arguments semblent, en effet, le justifier :

Argument 1 : L'absence de minéralisation du COF et son transfert direct des continents aux sédiments, se traduirait par une diminution de CO₂ atmosphérique au cours du Phanérozoïque, compensé par une augmentation en O₂ dans des proportions non remarquées.

Argument 2 : L'absence de minéralisation du COF se traduirait aussi par une augmentation continue au cours des temps géologiques de la teneur en COF des sédiments. Celle-ci n'est pas observée (figure I-6).

Ainsi, selon Berner, le COF se minéralise entièrement lors de sa libération et constitue une source de CO₂ pour l'atmosphère. C'est en raison de ce « postulat » que de nombreuses estimations des stocks et flux de carbone organique dans les sols, rivières et sédiments ne prennent pas en compte la possible contribution de COF dans le cycle supergène (Holland, 1978 ; Degens *et al.*, 1991 ; Probst, 1992; Eswaran *et al.*, 1993; Amiotte Suchet, 1995; Balesdent, 1996; Batjes, 1996; Adams and Faure, 1996; Ludwig *et al.*, 1996 ; Carter *et al.*, 1997 ; Aitkenhead and McDowell, 2000).

A-3) Le devenir du carbone organique fossile : résistance face aux altérations supergènes ?

Les conclusions de Berner s'opposent à de nombreuses études ponctuelles témoignant de la contribution de COF dans les sols et cours d'eau. Ces dernières, particulièrement diverses, se distinguent par le type d'approche : mono-compartiment ou pluri-compartiments ; mono-analytique ou pluri-analytiques. À celles-ci s'ajoutent des travaux plus spécifiques, s'intéressant plus particulièrement à la dégradation du COF (approche terrain ou expérimentale), ou à l'estimation de flux à l'échelle mondiale.

A-3-1) Les études mono-compartiment, mono-analytique

A-3-1-1) Dans les sédiments récents, marins et lacustres

- Dès 1974, Combaz a mis en évidence par étude microscopique la présence de matière organique fossile (MOF) hétérogène dans les sédiments quaternaires de la mer de Norvège (figure I-7). Cette matière organique est observée sous formes de palynomorphes⁵ d'âges paléozoïques à actuels, ainsi que sous formes de particules organiques opaques, dont le pouvoir réflecteur peut atteindre 1,5⁶.

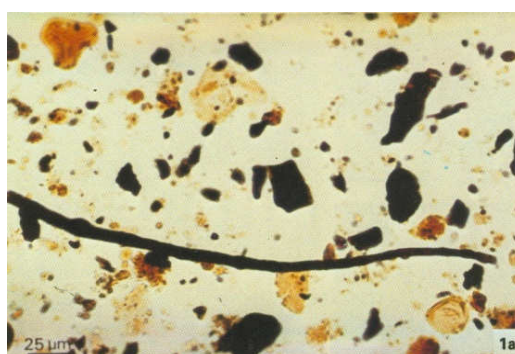


Figure I-7 : Palynofacies observés au sein d'un échantillon de sédiment de mer de Norvège datant de l'Holocène. Mélange de constituants contemporains de la sédimentation et d'éléments remaniés plus ou moins anciens (Combaz in Durand, 1980)

⁵ Les Palynomorphes sont des microfossiles à parois organique.

⁶ Le pouvoir réflecteur (Ro%) des macéraux organiques croît progressivement avec leurs maturités thermiques en raison de l'aromaticité progressive des structures organiques.

- Ce type d'étude n'est pas isolé, puisque Tyson (1995) regroupe dans son ouvrage plus de 12 études similaires (tableau I-1), menées de 1959 à 1990. Ces études montrent une contribution fossile significative dans des sédiments récents du monde entier.

% palynomorphes fossiles/particules observées	Site	référence
≤80	Mer de Norvège	Combaz <i>et al</i> (1977)
>50	Antarctique	Groot <i>et al</i> (1967)
>50	Antarctique	Truswel et Drewry (1984)
>50	Baie d'Hudson	Bilodeau <i>et al</i> (1990)
31 (+- 25)	Sédiments océaniques (>3000m)	Groot et Groot (1971)
≤10	Mer Noire	Traverse (1974)
≤7	Cote Est USA	Heusser et Balsam (1985)
4	Cote Est Canada	Mudie (1982)
≤3	Cote Nord Est USA	Heusser et Balsam (1977)
2 à 10	Sud de la mer de Nord	Chowdhury (1983)
commun	Cote Est USA	Heusser (1983)
Peu	Delta de L'Oronico	Muller (1959)

Tableau I-1 : compilation des différentes études optiques indiquant la contribution fossile dans divers sédiments récents (Tyson, 1995).

- Moran *et al* (1998) discutent du rapport $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ⁷ dans les sédiments marins des côtes de l'Oregon, du Pérou, de Baja, de l'Equateur et de Cape Hatteras. Certaines valeurs faibles de ce rapport ($354 \cdot 10^{-15}$) supposent un âge de 32,5 millions d'années, incompatible avec les âges attendus (non précisés). Ceci sous entend une contribution de MOF remaniée dans les sédiments étudiés.

- Dickens *et al* (2004a) ont travaillé sur le « Graphitic black Carbon⁸ » (GBC) contenu dans les sédiments lacustres du lac Washington ainsi que dans les sédiments marins de la côte pacifique nord américaine. Le GBC contenu dans les sédiments lacustres est majoritairement constitué de suies, issues de l'activité anthropique, tandis que celui contenu dans les

⁷ ^{129}I est un isotope de période radioactive longue (15,7 millions d'années) : le rapport $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ peut être utilisé en datation à l'instar du rapporte $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$.

⁸ Le « Black Carbon » est le produit carboné de combustions incomplètes de combustibles fossiles, ou de biomasse. D'origine anthropique ou naturelle, cet objet consiste en un continuum comprenant charbons de bois et suies... Le « Graphitic black Carbon » correspond au pôle le plus évolué et le plus réfractaire, structurellement proche du graphite (Gélinas *et al*, 2001).

sédiments marins serait d'origine fossile, libéré par l'altération de roches mères de natures non précisées.

A-3-1-2) Dans les particules fluviales

- Kao et Liu (1996) mettent en évidence une composante fossile dans le flux de carbone organique particulaire (COP) transporté par la rivière Lanyang Hsi (Taiwan). Les âges ^{14}C mesurés, supérieurs à 10.000 ans, montrent que cette composante représenterait 70 % du flux total (0,55 t/h/an). Ce flux serait dépendant de l'activité humaine, notamment de la construction de routes favorisant l'érosion mécanique des roches (ardoises argileuses, grès).

L'intérêt majeur de ces études, souvent anciennes, est de prouver la présence de COF dans les compartiments récents, voir actuels. En revanche, elles ne permettent pas le suivi du COF lors du transfert d'un compartiment à l'autre (roches, altérites, sols, particules fluviale) et ne permettent pas non plus de quantifier la minéralisation possible de ce carbone. Par ailleurs, toute approche mono-analytique peut être critiquée dans la mesure où elle ne délivre que des informations partielles sur l'objet étudié.

A-3-2) Les études mono-compartiment, pluri-analytiques

A-3-2-1) Dans les sédiments récents, marins et lacustres

- Eglinton *et al* (1997) ont proposé une étude sur la matière organique des sédiments marins des mers Noire et Arabique. Les résultats des analyses isotopiques (^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ PDB‰) et moléculaires montrent que la MO sédimentée est composée d'un ensemble de matières organiques de diverses origines : autochtones (planctonique), et allochtones (plantes supérieures et composante fossile) (figure I-8).

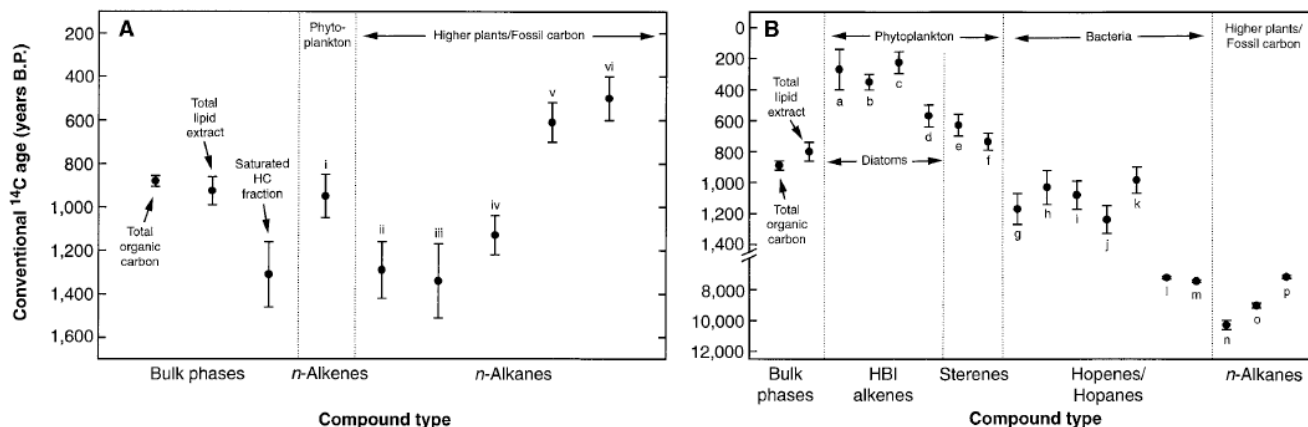


Figure I-8: Ages ^{14}C (BP) des différents composants de la matière organique des sédiments de la mer Noire (A), et Arabique (B) (Eglinton et al, 1997), (Eglinton et al, 1997).

Les âges parfois élevés témoignent de contributions fossiles.

- Wakeham *et al* (2004) publient une seconde étude sur les sédiments du lac Washington, couplant analyses géochimiques (carbone organique, C, N), isotopiques (^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ PDB‰) et moléculaires (hydrocarbures aliphatiques et polycycliques⁹). Les résultats révèlent la présence de carbone ancien, issu de l'érosion des sols et roches du bassin versant (natures non précisées).

- Dickens *et al* (2004b) couplant analyses isotopiques (^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ PDB‰) et dosage du GBC sur des échantillons de sédiments marins de la côte nord américaine. Les âges ^{14}C du GBC sont anciens et varient de 18600 ± 1000 à 37450 ± 670 ans, tandis les âges estimés des « bulk » varient entre 30 ± 700 et 2220 ± 2090 ans. Ceci témoigne de l'origine fossile du GBC.

- Drenzek *et al* (2007) étudient les sédiments marins de la mer de Beaufort à l'aval de la rivière Mackenzie (nord du Canada) en couplant analyses géochimiques (C, N), isotopiques (^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ PDB‰) et moléculaires. A l'instar des travaux d'Eglinton, les résultats montrent que la MO sédimentée est composée d'un ensemble de matières organiques de diverses origines : autochtones (planctonique), et allochtones (terrestre et fossile). La composante fossile, issue de l'érosion des roches du bassin versant, représenterait de 40 à 50% de la MO sédimentée.

⁹Les hydrocarbures sont des composés organiques constitués de carbone et d'hydrogène. On distingue les hydrocarbures à chaîne ouverte contenant plusieurs atomes de carbone (aliphatiques) de ceux dont les atomes de carbone forment un ou plusieurs cycles fermés (polycycliques).

A-3-2-2) Dans les sols

- Lichtfouse *et al* (1997 a,b) proposent une étude moléculaire de la matière organique des sols du bassin parisien (n-alcanes¹⁰, 1997a et hydrocarbures aromatiques polycycliques¹¹, 1997b), couplée avec des analyses isotopiques (¹⁴C, $\delta^{13}\text{C}$ PDB‰). Les résultats obtenus montrent que le rapport ¹³C/¹²C de certains n-alcanes et aromatiques n'évolue pas conjointement à celui de la végétation. Ceci impose une origine différente de ces composés : les aérosols ou la roche mère (nature non précisée).

A-3-2-3) Dans les particules fluviales

- Raymond et Bauer (2001) proposent une étude isotopique (¹⁴C, $\delta^{13}\text{C}$ PDB‰) du Corg dissous et particulaire (COD et COP) actuellement véhiculé dans les rivières et fleuves Amazone, Hudson, York, Parker, Potomac, Susquehanna, Rappahannock et James. Les âges ¹⁴C, très variables selon le site et la date de prélèvement, peuvent atteindre 4763 ans (COP de l'Hudson) et témoignent ainsi de la présence de COF dans les flux actuels. Par ailleurs, ces auteurs mettent en relation la proportion de ce COF dans les flux avec la nature du bassin versant (relief...), et montrent, par incubation expérimentale de COD, un comportement différentiel entre une composante organique récente, labile et une composante ancienne, plus résistante.

- Raymond et Bauer (2004), publient une étude similaire sur les rivières nord américaines Parker, Hudson, York, Susquehanna, Delaware et l'étendent à six sous bassins versants de l'Hudson. Leurs résultats montrent une contribution bimodale, récente et fossile, au sein du COP de ces rivières dépendante des caractéristiques des bassins versants (relief, zone humide), ainsi que de la nature des roches mères altérées (figure I-9).

- Masiello et Druffel (2001) montrent une contribution de matériel organique fossile dans la rivière Santa Clara (Californie) en utilisant des analyses isotopiques (¹⁴C, $\delta^{13}\text{C}$ PDB‰), géochimiques (C, N) ainsi que le dosage de Black Carbon.

¹⁰ Les n-alcanes sont des hydrocarbures aliphatiques saturés de formule générale $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, avec n le nombre d'atomes de carbone dans la molécule.

¹¹ Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont formés de cycles insaturés à six atomes de carbone.

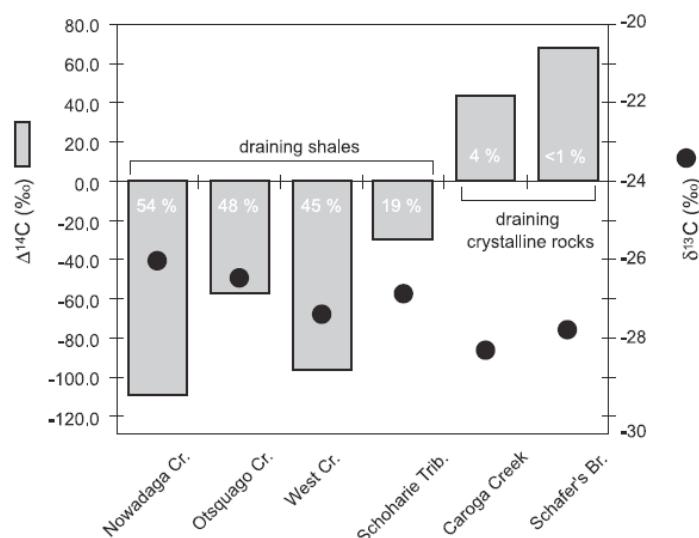


Figure I-9: $\Delta^{14}\text{C}$ et $\delta^{13}\text{C}$ ‰ du COP de six rivières affluentes de l'Hudson en fonction de la nature des roches mères (shales ou cristallines) (Raymond et Bauer 2004). Les $\Delta^{14}\text{C}$ faibles du COP des rivières drainant des shales (marnes ou schistes) témoignent d'une contribution importante en COF.

A-3-2-4) Dans les profils d'altération de roches

- Petsch *et al* (2000, 2001 a,b, 2003, 2004) proposent une série d'études de profils d'altération de « black shales¹² », utilisant pour cela un très vaste panel analytique : analyses géochimiques (carbone organique total (COT), C,N,S), analyse infrarouge, pyrogramme, spectrométrie à résonance magnétique nucléaire, analyses moléculaires et analyses isotopiques (^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ PDB‰). Les trois principaux résultats de ces études sont : -1) une perte progressive du COF allant de 60 à 100 % selon les sites étudiés (figure I-10) ; -2) une non sélectivité des composés organiques dégradés ; et -3) le rôle des bactéries dans la minéralisation du COF.

- Galy *et al* (2008) ont suivi le Corg libéré par l'érosion de la chaîne Himalayenne, depuis les roches sources jusqu'aux sédiments du golfe du Bengale (Océan Indien). Ils ont pour cela couplé micro-spectroscopie Raman, Microscopie électronique en Transmission (MET) et mesures du ^{14}C . Cette étude diffère des précédentes car elle porte sur des roches métamorphiques : les résultats montrent que la matière organique y est plus ou moins totalement transformée en graphite, et ainsi stabilisée. Ces auteurs considèrent que 30 à 50%

¹² Shale : mot anglais s'appliquant aux roches sédimentaires litées à grains fins, en général argileuses ou marneuses, mais s'applique aussi aux schistes argileux.

du carbone organique présent initialement dans les roches himalayennes sont conservés au cours du cycle d'érosion et finalement enfouis dans les sédiments.

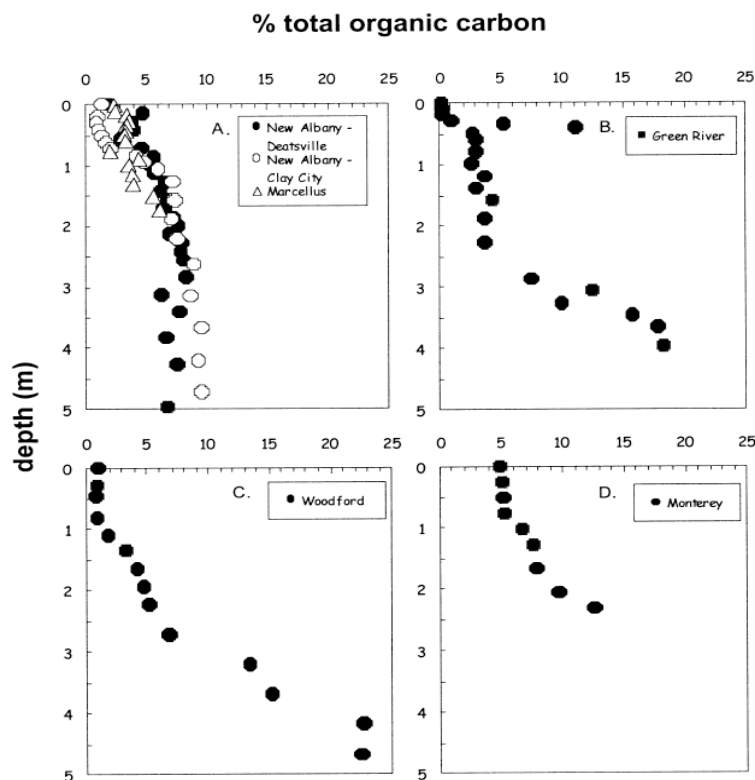


Figure I-10: Minéralisation du COF le long de profils d'altérations de « black shales » (Petsch et al, 2000). Cette minéralisation peut être totale (Green River), ou partielle (New-Albany et Marcellus).

Les études pluri-analytiques appuient les résultats obtenus par les études mono-analytiques et confirment la contribution de COF dans les eaux et profils d'altérations. Toujours mono-compartiments, elles ne permettent pas le suivi du COF lors de son transfert d'un compartiment à l'autre, ni l'estimation de flux. Les travaux de Petsch *et al* autorisent par contre une première quantification de la minéralisation du COF. Cependant, cette quantification est faussée car elle n'est pas normée par rapport à une phase insoluble. Les résultats obtenus suggèrent toutefois un comportement différentiel du COF contenu dans les divers profils étudiés.

A-3-3) Les études pluri-compartiments, mono-analytique

- Di-Giovanni *et al* proposent une série d'études portant sur trois principaux sites situés en France: le bassin de Chaillexon (1994, 1997, 1998, 1999c, 2000a,b), le bassin des Peyssiers (1999a,b), ainsi que le bassin du Moulin (2000b). Ils démontrent, à l'aide d'analyses optiques (palynofacies), et / ou pyrolyse Rock-Eval, la contribution significative de MOF dans les sols (jusqu'à 60 % de la MO dans les horizons argilo-humiques), cours d'eaux (de 5 à 90% selon le site étudié) et sédiments lacustres. La contribution de MOF dans les compartiments étudiés est dépendante de la teneur initiale en MO des roches altérées, de la nature de l'altération, chimique ou mécanique, ainsi que la densité du couvert végétal.

- Sebag *et al* (2006) poursuivent le même raisonnement sur trois sites supplémentaires : les bassins versants du Négron (Indre et Loire), de Claps (Drome), ainsi que la vallée de l'Indre. Leurs résultats sont comparables à ceux obtenus par Di-Giovanni *et al* (figure I-11).

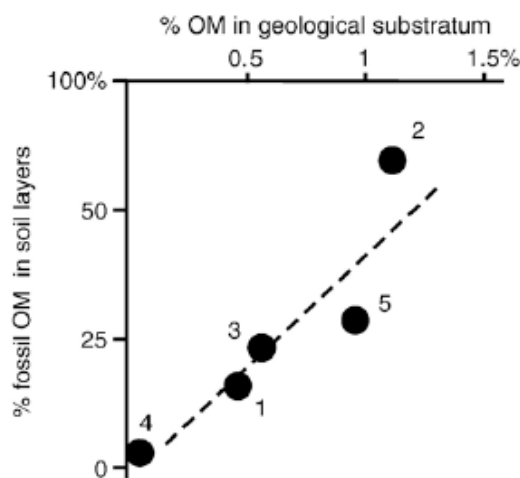


Figure I-11: Relation entre la concentration en MO des roches avec la proportion de MOF au sein de la MO des sols sus-jacents, 1- bassin de Chaillexon, 2- bassins de Draix, 3- bassin du Négron, 4- vallée de l'Indre, 5- bassins de Claps (Sebag et al, 2006). La proportion en MOF au sein de la MO des sols augmente avec la teneur en MO du substratum géologique.

- Copard *et al* (2006) utilisent la pyrolyse Rock-Eval pour suivre le COF lors des transferts roches / altérites, altérites / sols et roches / particules fluviatiles sur le site de Draix (France). Cette étude met en évidence la résistance (qualitative et quantitative) de la MOF lors des passages roches / altérites (érosion chimique) et roches / particules fluviatiles (érosion

mécanique). Le transfert altérites / sols (érosion (bio) chimique) se traduit par contre par une minéralisation et un changement qualitatif du COF.

Ces études pluri-compartiments présentent le net avantage de suivre le transfert du COF du compartiment source (roches mères) aux compartiments récepteurs (sols, eaux, altérites). Ceci permet de caractériser la MOF en terme de populations de particules organiques ayant chacune des origines et destinées diverses. Les analyses utilisées (majoritairement l'optique) ne permettent cependant pas de quantifier ni le COF au sein des différents compartiments, ni le % de minéralisation lors de son transfert.

A-3-4) Les études pluri-compartiments, pluri-analytiques

- Leithold et Blair (2001) proposent une première étude « pluri-compartiments, pluri-analytique » permettant le suivi du COF dans le bassin versants de la rivière Eel (Californie). Cette rivière est creusée au sein du « Franciscan Complex », formation géologique hétérogène constituée de marnes et de blocs de grès, appelée « mélange » par les auteurs (COT = 0,3%). Cette étude, complétée par un second travail (Blair *et al*, 2003), met en évidence la contribution fossile dans les sols (50%), colluvions (95%), particules fluviales (35 à 65%) mais aussi dans les sédiments marins à l'aval de la rivière (20 à 60 %) (figure I-12). Le panel analytique utilisé comprend analyses géochimiques (carbone organique, C, N) et isotopiques (^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ PDB‰).

- Gomez *et al* (2003) couplent analyses géochimiques (carbone organique, C, N) et isotopiques ($\delta^{13}\text{C}$ PDB‰) pour suivre le COF des roches (grès et argilites, COT = $0,3 \pm 0,2$ %) vers les sols et particules fluviales des bassins versants de la rivière Waipaoa (Nouvelle Zélande). Leurs résultats montrent une composition bimodale (récent / fossile) du flux de COP des rivières, dépendante du taux d'altération mécanique et du flux de matière solide.

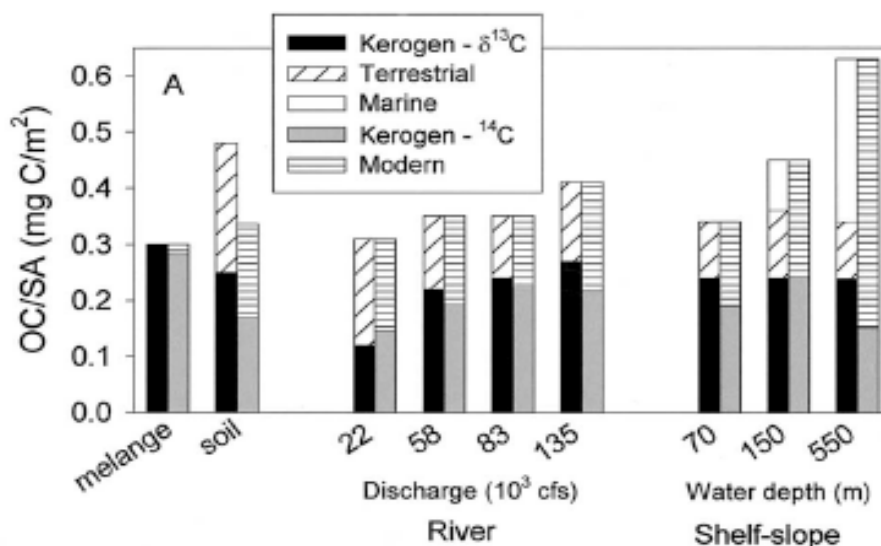


Figure I-12: Contribution fossile au sein des compartiments, roches (mélange) sols, particules fluviales et sédiments marins (Shelf-slope). (Blair et al, 2003).

OC/SA= concentration en Corg rapporté à la surface spécifique de l'échantillon analysé.

- Komada *et al* (2005) suivent le COF le long du bassin versant de la rivière Santa Clara (Californie), de la roche (sédiments cénozoïques, COT de 0,2 à 4,3 %) à l'océan. Ces auteurs ont séparé chaque échantillon en trois classes différentes (lipides, fractions hydrolysable et non hydrolysable) et examinent leurs signatures respectives ^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ PDB‰. Ils montrent ainsi une contribution fossile significative dans les compartiments étudiés, majoritairement sous forme non hydrolysable (Kerogen).

- Leithold *et al* (2006) comparent les signatures géochimiques (C, N) et isotopiques (^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ PDB‰) du flux de COP de six rivières américaines et néo-zélandaises avec celles des roches mères des bassins versants. Tout comme les travaux de Gomez, les résultats montrent une composition bimodale (récent / fossile) du flux de COP des rivières dépendante de l'altération mécanique. Cet article met aussi en avant l'impact des facteurs de station des bassins versants sur ces flux: l'absence de reliefs et la présence de sols développés favorisent la contribution récente (93% du COP, rivière Siuslaw), et réciproquement le relief et l'absence de sols favorisent l'érosion mécanique et la libération de COF (jusqu'à 75 % du COP, rivière Waiapu) (Figure I-13).

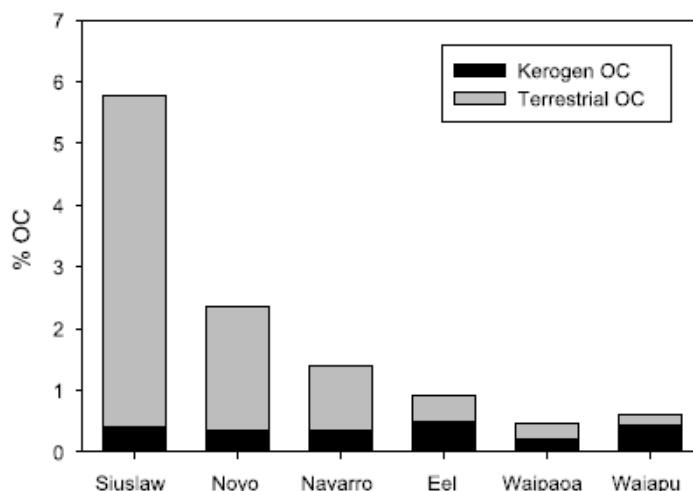


Figure I-13: Contribution fossile (Kerogen) au sein des flux de COP des rivières Siuslaw, Noyo, Navarro, Eel, Waipaoa et Waiapu (Leithold et al, 2006).

- Hilton *et al* (2008) utilisent des analyses géochimiques (Corg, C, N) et isotopiques ($\delta^{13}\text{C}$ PDB‰) pour suivre le COF dans les compartiments roches mères (schistes, COT de 0,01 à 0,3%), particules fluviales et alluvions de onze bassins versants montagneux néo-zélandais. Ces auteurs mettent ainsi en évidence une importante contribution de COF (environ 40%) dans le flux de COP de ces rivières.

L'ensemble de ces études, effectuées sur différent bassins versants à travers le monde, permettent le suivi du COF de sa source, vers les océans, notamment sous forme particulière. Les auteurs n'ont cependant que peu insisté sur la part du COF potentiellement minéralisée, ou dissoute lors de des transferts entre compartiments. Par ailleurs, les analyses sont, dans une large part, effectuées sur l'ensemble de la MO, et n'autorisent pas de distinctions entre les différentes populations.

A-3-5) Estimations de la minéralisation de COF

A-3-5-1) Approches expérimentales

- Sobalik et Cejka (1996) ont soumis des roches mères (sédiments Miocène du bassin de Sokolov, république Tchèque) à une oxydation expérimentale. L'analyse des produits de dégradation montre une évolution différentielle des différents composants organiques : les carbonyles¹³ résistant mieux que les alkyles¹⁴.

- Chang et Berner (1998 ; 1999) oxydent expérimentalement (phase aqueuse) un charbon bitumineux. Leurs résultats sont similaires à ceux de Sobalik et Cejka et montrent une évolution différentielle des différents composants organiques. Ces auteurs suggèrent aussi la formation de COD lors de cette oxydation et estiment, à partir du taux d'O₂ libéré, une durée de vie du COF entre 8000 et 80000 ans.

A-3-5-2) Approche terrain

- Keller et Bacon (1998) ont mesuré les flux de COF minéralisé (mesure de flux de CO₂, analyses ¹⁴C, δ¹³C PDB‰) sur des profils roches (shales du Crétacé) / sols de Damety (Canada). Ils ont montré, à partir de modèles, l'évolution temporelle de ces flux, ainsi que leur dépendance aux conditions hydriques (niveau de la nappe). Le flux de COF minéralisé semble avoir évolué, de l'Holocène (0,35 mol C m⁻²/an) à l'actuel (0,045 mol C m⁻²/an). Les auteurs estiment une durée de vie du COF proche de 10000 ans.

Ces quelques exemples d'études indiquent que le COF peut se minéraliser. Mais sa durée de vie, face aux altérations, reste importante (de l'ordre de 10000 ans) et semble dépendante des facteurs environnementaux, tel que les conditions hydriques, mais aussi de la nature de la MO.

¹³ Les carbonyles sont des composés organiques contenant un atome de carbone relié à un atome d'oxygène par une double liaison (C=O).

¹⁴ Les alkyles dérivent des alcanes par perte d'un atome d'hydrogène.

A-3-6) Les études globales

- En 1982, Meybeck, s'intéressant aux flux exportés par les grands bassins versants mondiaux, confirme le fait que la teneur en Corg de la charge solide transportée par les rivières est inversement proportionnelle à la densité de cette charge. En 1993a,b, il remarque à partir des données collectées sur le fleuve Huang He (Chine) que les faibles teneurs en Corg (0,5%) de la charge solide lors de crues sont les même que celles observées pour les roches sédimentaires du bassin versant (lœss sensibles à l'érosion). Il en déduit que le Corg transporté durant les crues provient exclusivement de ces formations et possède donc un caractère fossile. En extrapolant ce raisonnement aux flux de POC des principaux fleuves et principales rivières du monde (figure I-14), Meybeck propose un flux de COF transporté vers les océans sous forme particulaire atteignant 0,08 GT/an. Un tel flux représenterait environ 30% du flux de COP à l'échelle mondiale.

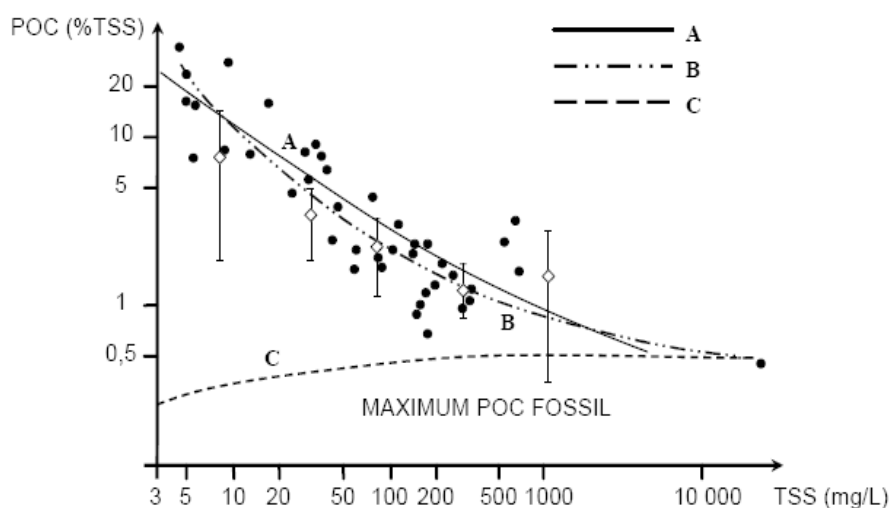


Figure I-14 : Comparaison entre les teneurs en Corg de la charge solide (POC -% TSS) avec la densité de cette charge (TSS en mg/L) (Meybeck, 2005).

- Courbe A : régression globale initiale (Meybeck, 1982) ;
- Courbe B : régression corrigée (Meybeck, 1993) ;
- Courbe C : contribution fossile maximum au sein du COP (Meybeck, 1993).

- Di-Giovanni *et al* (2002) utilisent les flux de bicarbonates des principaux cours d'eau mondiaux pour déterminer la quantité de roche carbonatée dissoute, ceci en tenant compte de leurs teneurs en CaCO_3 . Connaissant les COT moyens de ces mêmes roches, ces auteurs calculent un flux de 0,09 GtCOF/an libéré par l'érosion chimique, essentiellement fourni par

les zones climatiques humides, arctiques (toundra et taïga) et tempérées (respectivement 44, 28 et 23%).

- Copard *et al* (2007) présentent une étude similaire et utilisent les cartes des 40 principaux bassins versants mondiaux (résolution $1^\circ \times 1^\circ$, lithologie et runoff). Ces auteurs estiment qu'à l'échelle mondiale, le premier mètre de roches sédimentaires représente un stock de 1100 Gt de COF (figure I-15), comparable au stock contenu dans les sols. L'altération chimique de ces roches libérerait annuellement 0,04 GtCOF/an (figure I-16), dont 95 % seraient issus des seules formations marneuses.

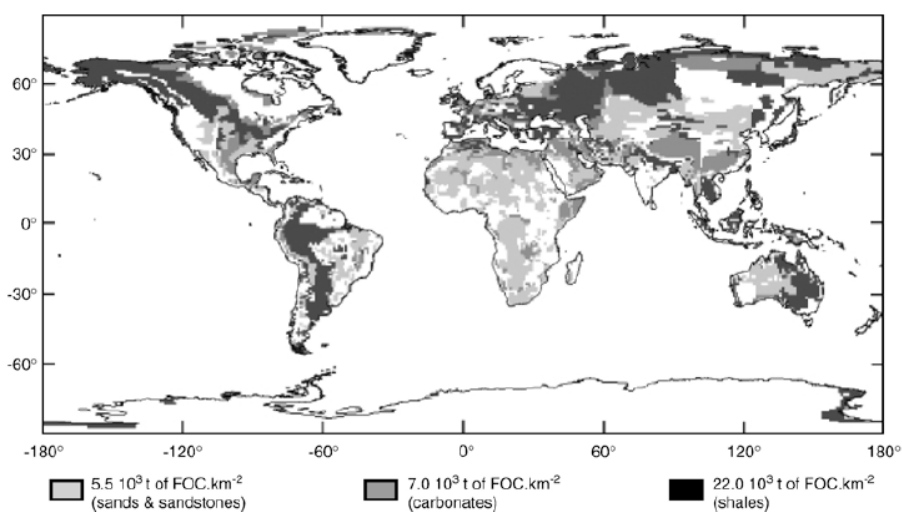


Figure I-15 : Stock de COF estimé dans le premier mètre de roches sédimentaires dans le monde (Copard *et al*, 2007). Grès et sables - gris clair ; roches carbonatées - gris foncé et shales - noir. Ce stock serait de 1100 Gt de COF et comparable au stock contenu dans les sols.

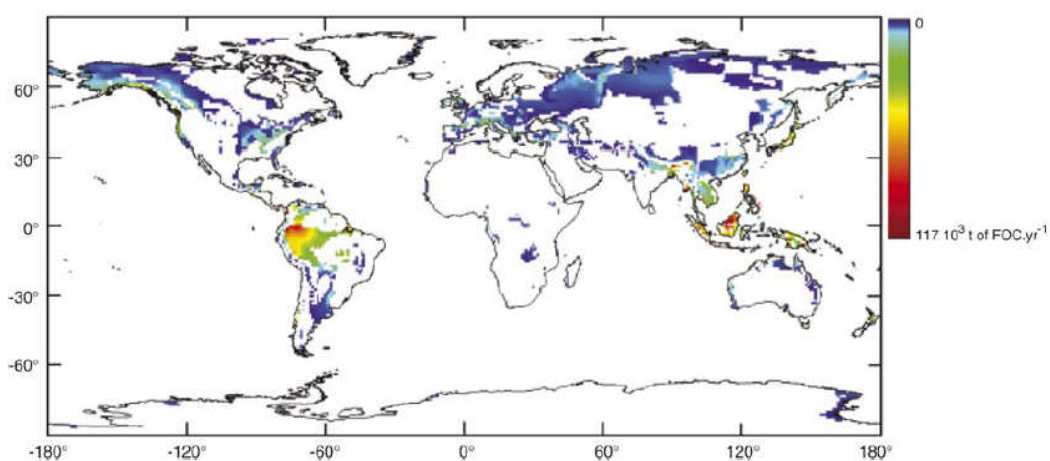


Figure I-16 : COF libéré annuellement par l'altération chimique des Roches dans le monde (Copard *et al*, 2007). Ce flux atteindrait 0,04 Gt/an dont 95 % seraient issus des seules shales (marnes et schistes).

- Blair *et al* (2003, 2004) comparent les devenir possibles du COF au sein des bassins de la rivière Eel et de l'Amazonie. Si, dans le cas de l'Eel, le COF libéré par l'altération mécanique des roches (Franciscan Complex) est rapidement transporté et enfoui dans les sédiments marins, il en est autrement dans le cas de l'Amazonie. Le COF, issu de l'altération des roches sédimentaires andines, est piégé dans les sols et zones humides de l'immense plaine alluviale et il devient très difficile de connaître son devenir.

Ces auteurs présentent le raisonnement suivant : les rivières de montagnes du type de la rivière Eel sont connues pour être à l'origine de 40% du flux sédimentaire transporté vers les océans à l'échelle mondiale (Milliman et Syvitsky, 1992), ce qui représente 8 Gt/an en régime naturel (hors impact anthropique, barrages, retenues...). Les teneurs en Corg de ces sédiments varient selon les auteurs et rivières étudiées (cf. partie I-3-4), mais sont toujours du même ordre de grandeur que le 0,5% proposé par Meybeck (1993), ainsi que de la teneur moyenne mondiale des roches sédimentaires (Garrel et mackensie, 1971 ; Ronov et Yaroshvskiy, 1976). C'est sur cette base que Blair *et al* proposent un flux de COP fossile, transporté des régions tectoniquement actives aux océans, dépassant 0,04 GtC/an.

Compte tenu de leur faible nombre, ces quelques estimations de flux de COF à l'échelle globale doivent être prises avec précaution. De plus, aucune ne prend en compte la part de COF libéré par les roches métamorphiques. Elles mettent cependant en avant l'importance significative des flux fossiles en regard des flux de COP totaux, estimés entre 0,09 et 0,3 GtC/an (Berner, 1992 ; Ludwig *et al*, 1996 ; Stallard, 1998), et confirment ainsi le fait que la contribution de COF doit être prise en compte dans le cycle du carbone.

B) Bilan et stratégie

La minéralisation totale du COF libéré par l'altération des roches a longtemps été mise en avant pour expliquer le maintien d'une concentration « moyenne » en CO₂ atmosphérique. Les études précédemment exposées prouvent cependant, et par des moyens divers (Tableau I-2), la présence de COF dans les compartiments sols, particules fluviales et sédiments récents, témoignant de sa relative résistance à l'altération. Plusieurs questions restent cependant en suspend :

- 1) Faute de méthode adaptée, aucune étude n'a réellement quantifié les pertes de COF lors des transferts d'un compartiment à un autre, et cela malgré l'existence d'une dégradation, tant quantitative que qualitative, avérée.
- 2) Une seule étude intègre à la fois les composantes « érosion mécanique » et « érosion chimique » dans le raisonnement (Copard *et al*, 2006).
- 3) Aucune étude n'a confronté des résultats de dégradation de COF « in situ » et expérimentales.
- 4) Les taux d'altérations, tant (bio)chimiques, que mécaniques montrent une dépendance aux facteurs géographiques, climatiques et anthropiques. Cette dépendance reste cependant peu contrainte : nous n'avons aujourd'hui aucune idée de la hiérarchisation de ces facteurs concernant leurs impacts sur les flux.
- 5) Le flux de COF sous forme particulaire est relativement bien documenté. Ce n'est pas le cas pour les flux sous forme dissoute. Evoquée dans les travaux de Raymond et Bauer, la formation de COD fossile est aussi suggérée lors de dégradations expérimentales de COF.
- 6) Aucune étude ne propose de bilans de COF libéré à la fois par les altérations mécaniques et chimiques à l'échelle d'un bassin versant.
- 7) Aucune étude ne propose une modélisation de ces flux, ni de reconstruction temporelle.

	Approche mono-compartiment	Approche Pluri-compartiments	Approche Mono-analytique	Approche Pluri-analytiques	Estimation de dégradation du COF		Estimation de flux à l'échelle locale		Estimation de flux à l'échelle globale	
					Approche par le terrain	Approche expérimentale	Altération mécanique	Altération chimique	Altération mécanique	Altération chimique
Combaz <i>et al.</i> , 1974 Tyson, 1995 Moran <i>et al.</i> , 1998 Dickens <i>et al.</i> , 2004a Kao et Liu, 1997	+		+				+			
Eglinton <i>et al.</i> , 1997 Lichtfouse <i>et al.</i> , 1997a Lichtfouse <i>et al.</i> , 1997b Wakham <i>et al.</i> , 2004 Dickens <i>et al.</i> , 2004b Masiello et Druffel, 2001 Raymond et Bauer, 2001 Raymond et Bauer, 2004 Petsch <i>et al.</i> , 2000 Petsch <i>et al.</i> , 2001a Petsch <i>et al.</i> , 2001b Petsch <i>et al.</i> , 2003 Petsch <i>et al.</i> , 2004 Drenzee <i>et al.</i> , 2007	+			+	+					
Di-Giovanni <i>et al.</i> , 1997 Di-Giovanni <i>et al.</i> , 1998 Di-Giovanni <i>et al.</i> , 1999a Di-Giovanni <i>et al.</i> , 1999b Di-Giovanni <i>et al.</i> , 1999c Di-Giovanni <i>et al.</i> , 2000a Sebag <i>et al.</i> , 2006 Copard <i>et al.</i> , 2006		+	+		+	+				
Leithold et Blair, 2001 Blair <i>et al.</i> , 2003 Gomez <i>et al.</i> , 2003 Komada <i>et al.</i> , 2005 Leithold <i>et al.</i> , 2006 Hilton <i>et al.</i> , 2008 Galy <i>et al.</i> , 2008		+		+					+	
Sobalik <i>et al.</i> , 1996 Chang et Berner, 1998 Chang et Berner, 1999 Keller et Bacon, 1998	+	+			+	+				
Di-Giovanni <i>et al.</i> , 2001 Meybeck, 1993 Copard <i>et al.</i> , 2007									+	+
Ce travail		+		+	+	+	+	+		

Tableau I-2 : récapitulatif des approches des différentes études présentées.

Notre étude vise donc à répondre, au moins partiellement, à ces questions et notre stratégie est la suivante (tableau I-2, figure I-17) :

1- Mise en évidence de la contribution fossile dans les compartiments étudiés. Il s'agit de distinguer et caractériser au sein d'un compartiment le COF du carbone organique récent (COR).

Nous avons pour cela choisi une approche 'multi-compartiments-multi-analytiques' comportant des investigations géochimiques (Pyrolyse Rock-Eval, C, N), isotopiques (^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ PDB‰), moléculaires (Couplages chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse), ainsi que mesures du pouvoir réflecteur des macéraux organiques.

2- Estimation la part de COF minéralisée ou dissoute lors des transferts entre compartiments. Ceci passe par le développement d'une méthode de quantification de la MOF : le palynofacies quantitatif.

Les estimations de pertes seront menées selon deux approches :

- À travers une approche terrain, par le suivi quantitatif du COF lors des transitions roches / altérites, altérites / sols, ainsi que roches / particules fluviales.
- À travers une approche expérimentale, le COF sera soumis à diverses altérations expérimentales (oxydation, hydrolyse et dégradation bactérienne) reproduisant les altérations observées en milieu naturel. Les dégradations, et dissolutions du COF seront estimées à partir d'analyses optiques des produits de dégradations, et par dosage du COD des eaux résiduelles.

3- Estimation des flux pour les compartiments étudiés afin d'appréhender les facteurs les contrôlant, ceci dans un but de modélisation.

Ceci nécessite l'étude de plusieurs bassins versants aux caractéristiques complémentaires connues (taux de végétation, pente), et dont on possède les chroniques d'exports (solides, dissous). La modélisation devra permettre : de hiérarchiser les facteurs contrôlant les flux, puis, dans un second temps, de proposer une évolution temporelle de ces flux tenant compte de l'évolution passée de ces facteurs ; et de tester la représentativité de petits bassins versants (échelle locale) sur de plus grandes unités (échelle régionale).

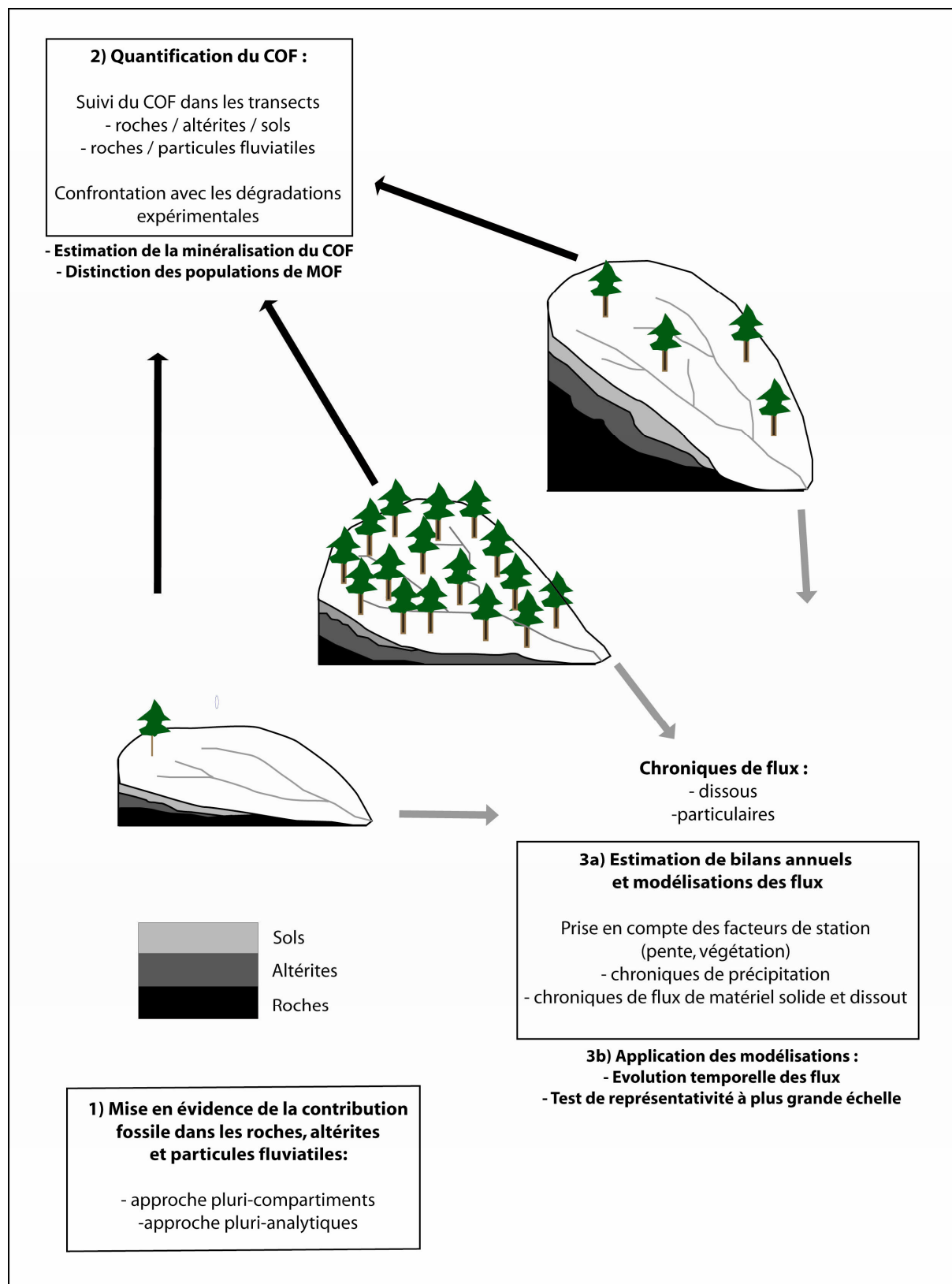


Figure I-17: Stratégie du présent travail
mise en évidence de la contribution fossile dans les compartiments étudiés.
 1) quantification du COF, estimation de pertes au travers d'approches terrains et expérimentales.
 2) modélisation des flux, reconstruction temporelle et changement d'échelle.

Chapitre II

Choix du site d'étude, échantillonnage, et présentation des méthodes analytiques



Où l'on sélectionne...

La question à l'origine de cette étude étant posée, nous allons maintenant justifier le choix de notre site d'étude, la stratégie d'échantillonnage, puis les méthodes analytiques auxquelles seront soumis les échantillons prélevés.

A) Site d'étude : les bassins versants de Draix

Le précédent chapitre a rappelé le rôle majeur des marnes dans la libération de COF à l'échelle mondiale. En effet, ces roches représentent environ 25 % des formations affleurant dans le monde et se caractérisent tant par leur concentration élevée en Corg (de l'ordre de 1%) que par leur nature fortement érodable (Copard *et al*, 2007). Elles se révèlent donc particulièrement adaptées à notre étude. Notre stratégie nous impose aussi le choix de plusieurs bassins versants aux caractéristiques différentes et complémentaires (pentes, couvertures végétales), et dont on possède les chroniques d'exports, dissous et particulaire (Simonnet *et al*, 1995 ; Mathys *et al*, 1996 ; Cras, 2005 ; Mathys ; 2006). Ceci nous a conduit à choisir les bassins versants expérimentaux de Draix situés dans les Préalpes méridionales françaises, à proximité de Digne (Alpes de Haute Provence).

Nous situerons les différents bassins étudiés à l'échelle régionale (Bassin de la Durance), puis présenterons plus en détail leurs caractéristiques géomorphologiques.

A-1) Le bassin versant de la Durance

La Durance est la principale rivière de Provence et des Alpes françaises du sud. Longue de 324 kilomètres et drainant un bassin versant de 14200 km² (figure II-1), elle est le troisième affluent du Rhône par le débit, mais la plus grande rivière torrentielle française. Elle se caractérise par l'importance de ses crues, ainsi que par le volume de la charge solide transportée. En régime naturel, près de 3000 m³/an de matériel sont ainsi transportés vers le Rhône, auxquels s'ajoutent 6 millions de tonnes de matières en suspension (IRS, 2001) : l'ensemble représente 30 à 40 % de la charge solide transportée par le fleuve. La contribution effective actuelle est moins importante du fait des nombreux aménagements de la rivière

depuis 1950 (canaux usiniers, barrages de Cadarache, de Mallemort, de Bompas....) retenant une part significative des particules fluviales. Elle représente cependant aujourd'hui encore 13 à 19% de la charge solide véhiculée par le Rhône (IRS, 2001).

Près de 80 % des matières en suspension (Fournier, 2004) seraient issus de l'érosion de terrains marneux, principalement situés sur la moyenne Durance (Miramont, 1998). Ces terrains, d'âge secondaire, forment des paysages fortement érodés appelés « badlands » (Figure II-2), et sont notamment constitués par les « terres noires » : formations à dominante argileuse datant du Bajocien à l'Oxfordien moyen. Leur concentration en Corg est voisine de 0,5% (moyenne établie sur 6000 échantillons, Artru, 1972).

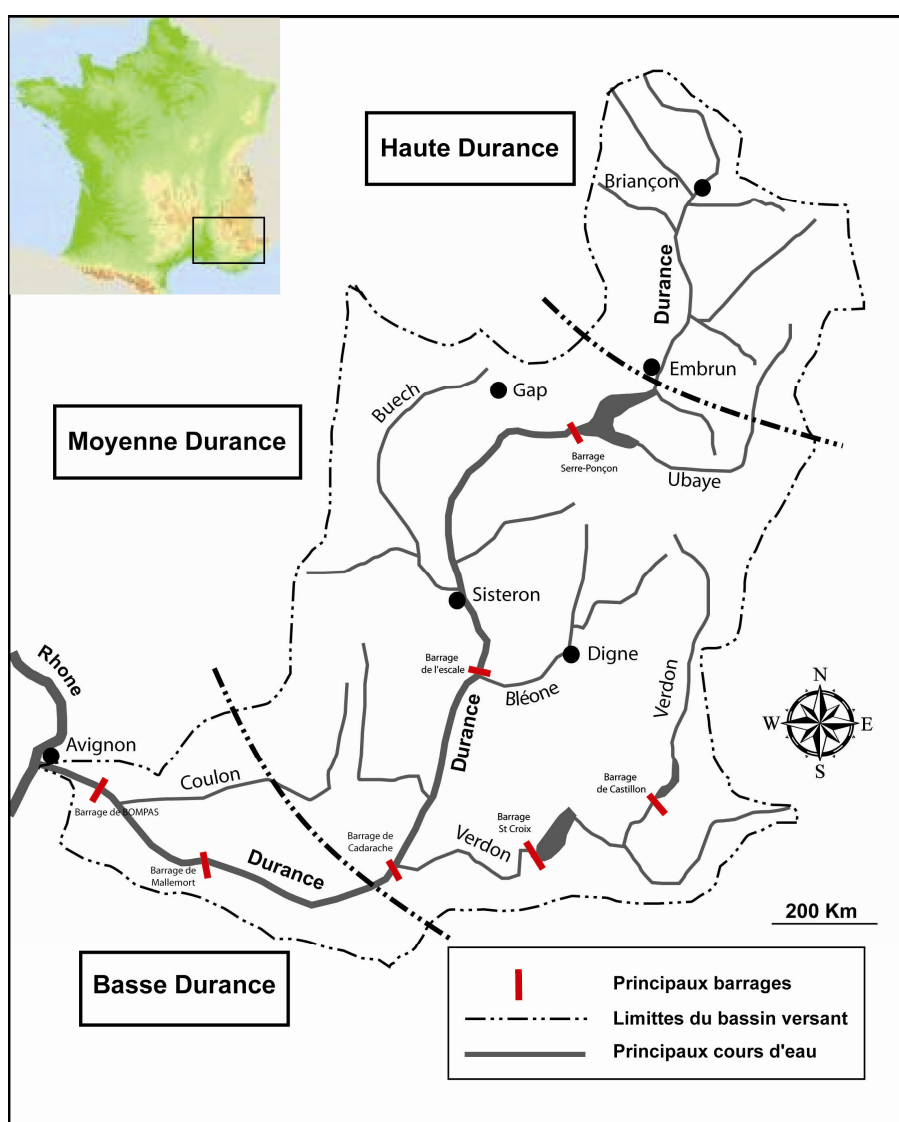


Figure II-1: Bassin versant simplifié de la Durance.

Nous remarquons l'importance relative du bassin de la moyenne Durance par rapport à ceux de la basse et haute Durance, ainsi que le nombre élevé de barrages entraînant une rétention significative des particules fluviales.



Figure II-2 : Paysage fortement marqué par l'érosion, appelé « badlands », sur terres noires Callovo-Oxfordienne, à proximité de village de Draix (Cliché Y Graz).

A-2) Les bassins versants expérimentaux de Draix

A-2-1) Historique des bassins versants

De part leur masse, les sédiments transportés par la Durance posent de nombreux problèmes, tels que l'envasement des installations hydroélectriques installées sur la rivière, ou de l'étang de Berre à l'aval des canaux usiniers détournant les eaux de la rivière. La méconnaissance des processus érosifs à l'origine de cette charge sédimentaire a conduit à une collaboration entre la division « Protection contre les érosions » du Cemagref et le service de Restauration des Terrains de Montagne (RTM) pour le choix et le suivi de sites pilotes représentatifs dans l'étude des processus érosifs et hydrologiques en milieu méditerranéen et montagnard. Ces sites, les bassins expérimentaux de Draix, sont situés sur les territoires communaux de Draix et du Brusquet près de Digne (Alpes de Haute Provence ; figures II-3 et II-4). Les cinq bassins (le Laval, la Roubine, le Moulin, le Francon et le Brusquet) sont complémentaires dans la mesure où ils reposent tous sur des formations marneuses, et possèdent des surfaces comparables (<108 ha), mais ils se distinguent par des caractéristiques géomorphologiques différentes (taux de couvert végétalisé, pentes moyennes). Cette complémentarité en a fait un objet d'étude très recherché, et les travaux, pluridisciplinaires, s'y déroulant sont formalisés depuis 1999 autour du Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS)

« Draix, étude de l'érosion en montagne », labélisé Observatoire de Recherche en Environnement par le ministère de la recherche en 2001 (ORE « Observatoire de recherche sur les processus hydrologiques et érosifs en montagne »).

Une grande partie des informations présentées sur ces bassins sont issues de la thèse de N. Mathys (2006).

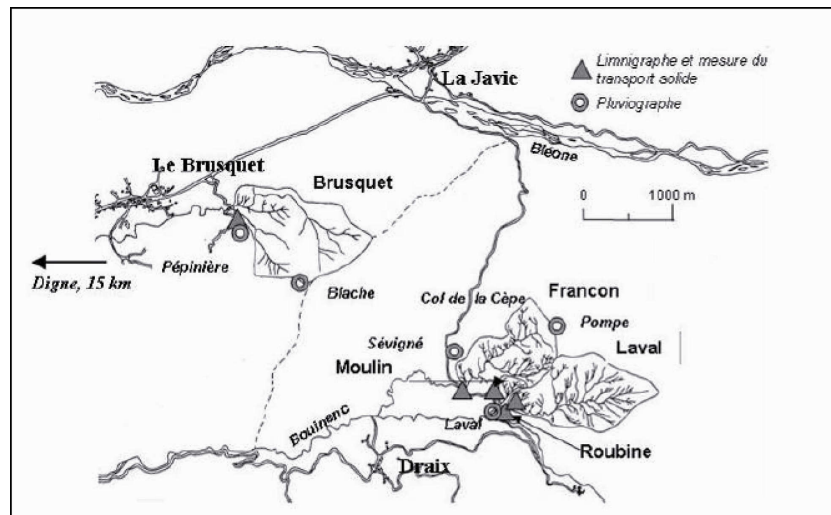


Figure II-3: Localisation des bassins versants de Draix (Mathys, 2006).

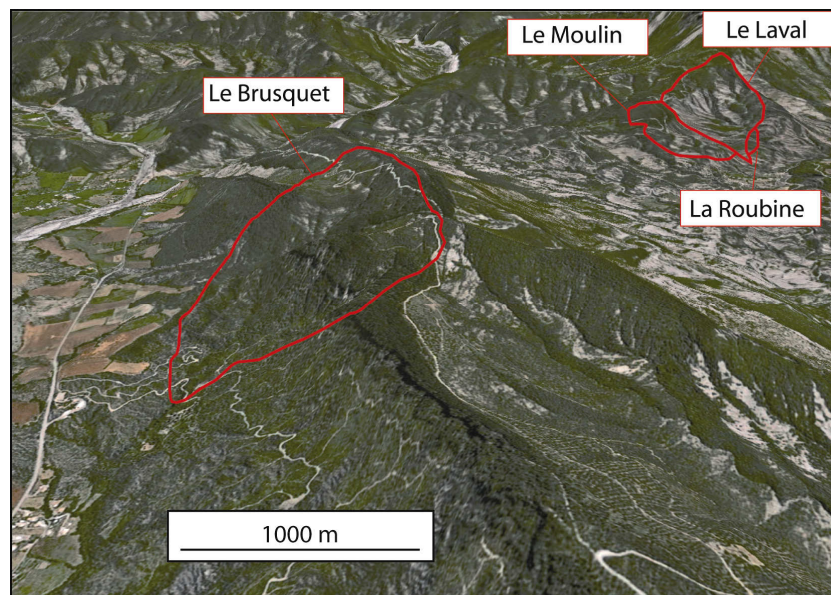


Figure II-4 : Positionnement des bassins versants de Draix.

A-2-2) Climat

Les bassins versants de Draix sont soumis à un climat subméditerranéen à tendance montagnarde (Brochot et Meunier, 1995 ; Cras, 2005 ; Mathys, 2006). Ceci se traduit par un printemps et un automne pluvieux (figure II-5), tandis que l'été est sec, entrecoupé d'orages et de précipitations intenses (Olivier, 1999). Seuls cinq jours dans l'année présentent un cumul de pluie supérieur à 30 mm tandis que 200 jours, environ, ne connaissent aucune précipitation. L'influence montagnarde se traduit par des températures fraîches l'hiver, responsables d'un nombre de cycles gel / dégel important favorisant l'altération mécanique des roches par cryoclastie (figure III-6).

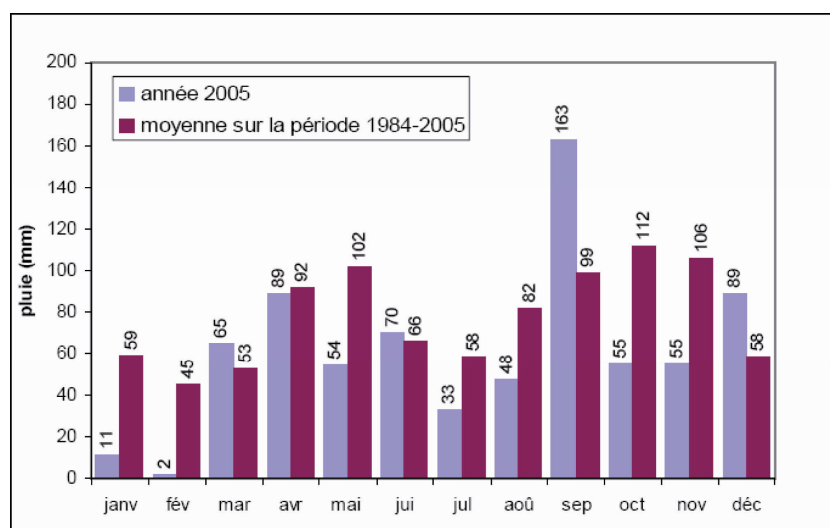


Figure II-5 : Pluies mensuelles de l'année 2005 et valeurs moyennes de 1984 à 2005 pour la station du Laval (Klotz et al, 2005).



Figure II-6 : Altération des roches par cryoclastie sur le site de Draix (Cliché J.R. Disnar).

Les bassins sont creusés sur des terrains jurassiques datant du Toarcien au Callovo-Oxfordien (figure II-7 et 8). Les formations rencontrées sont les suivantes :

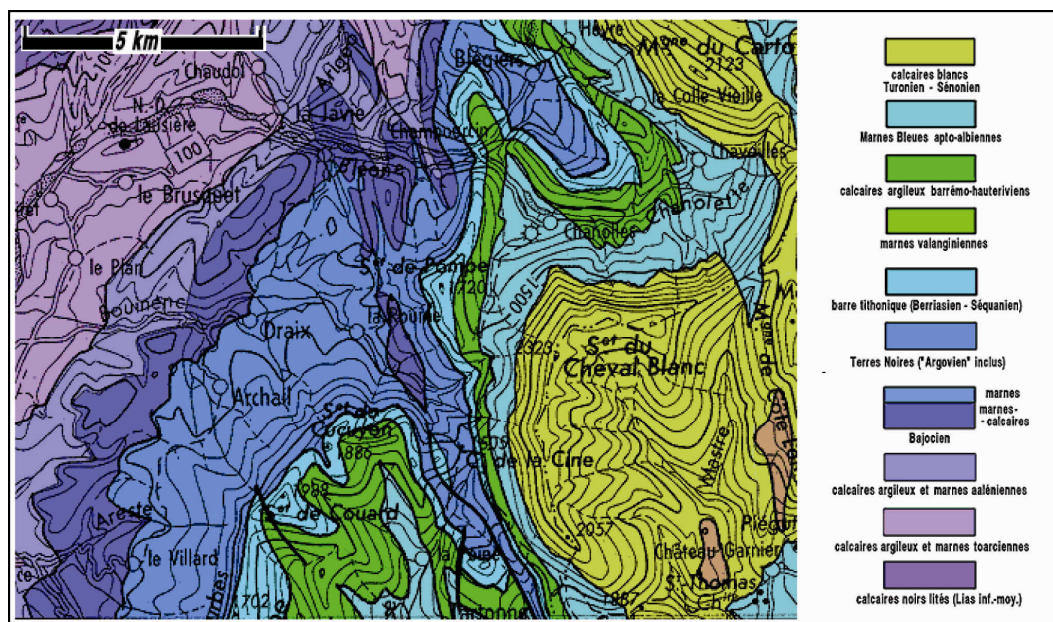
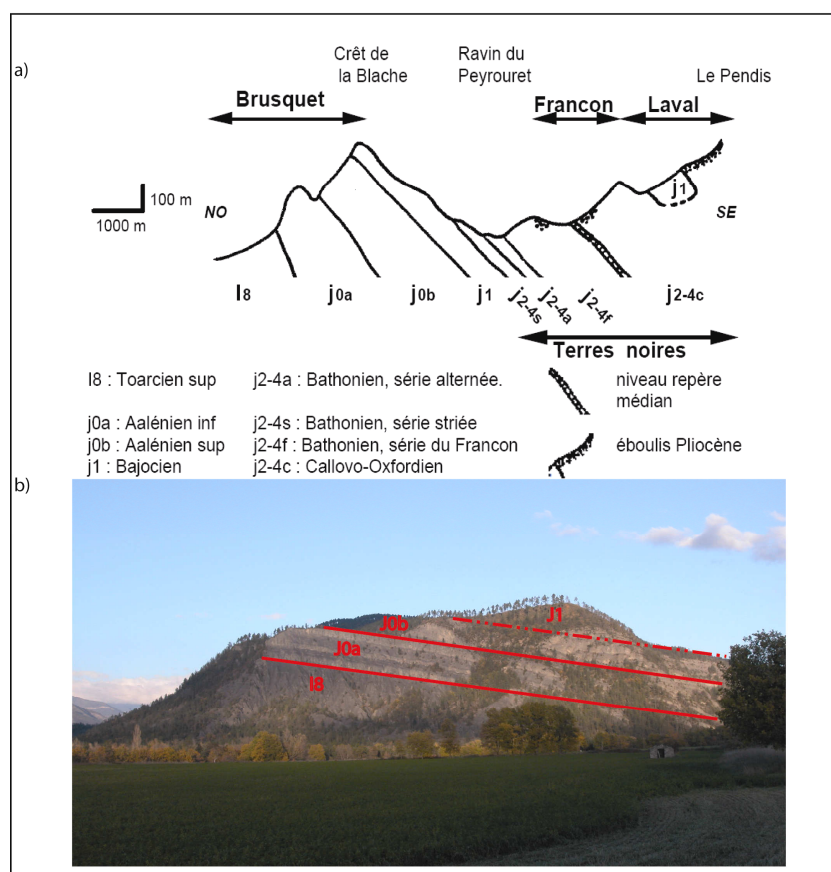


Figure II-7 : Carte géologique simplifiée de la région de Draix (Gidon, 1977).

- Le Toarcien : marnes noires tendres, parfois entrecoupées de bancs marno-calcaires. Son épaisseur peut atteindre 600 mètres.
- L'Aalénien inférieur : calcaires gris / bleu avec intercalation de marnes noires. L'épaisseur de cette formation est de 150 mètres.
- L'Aalénien supérieur : marnes grises et tendres de 70 mètres d'épaisseur.
- Le Bajocien : alternance régulière de bancs métriques calcaires et marneux. L'épaisseur de la formation atteint 170 mètres.
- Le Bathonien : alternance de bancs calcaires et de bancs marneux d'épaisseurs variables. Le Bathonien supérieur voit les calcaires s'estomper au profit des marnes.
- Le Callovo-Oxfordien : marnes noires schisteuses très homogènes, affectées par des accidents tectoniques.

Les terres noires regroupent les formations du Bathonien à l'Oxfordien et leur épaisseur varie de 300 mètres à plus de 1000 mètres.



*Figure II-9 : Contexte géologique des bassins versants de Draix,
 (a) coupe stratigraphique N-O / S-E des bassins versants de Draix (Mathys, 2006) ;
 (b) coupe naturelle de la crête de la Blache, affleurement des terrains du Toarcien au Bajocien
 (cliché Y. Graz)*

A-3) Caractéristiques géomorphologiques

des bassins versants

Les principales caractéristiques des bassins sont résumées dans le tableau II-1.

Bassin versant	Surface (ha)	Taux de terrain nu (%)	Pente moyenne (%)	Altitudes (min et max en m)	débuts des observations
Roubine	0,133	79	75	850-885	1983
Moulin	8	54	30	850-925	1988
Laval	86	68	58	850-1250	1984
Brusquet	108	13	53	800-1260	1987

Tableau II-1: Principales caractéristiques des bassins versants (Cemagref).

A-3-1) Le Laval

Le Laval (figure II-10) est un bassin versant de 86 hectares avec une pente moyenne de 58 %. Il est faiblement végétalisé (32 %, figure II-11), et la végétation est principalement constituée d'un boisement naturel de pins qualifié de "forestier pionnier" (Vallauri, 1997). Le substrat est composé de terres noires callovo-oxfordiennes, recouvertes par endroits par des formations allochtones (figure II-12) formées de cailloux et blocs calcaires emballés dans une matrice limoneuse de couleur marron clair à beige, et dont les épaisseurs varient de un à dix mètres. Ces formations d'origines alluvionnaires, ou gravitaires, sont datées du Pléistocène moyen ou de l'Holocène. Le Laval possède un réseau hydrographique bien développé et ramifié.

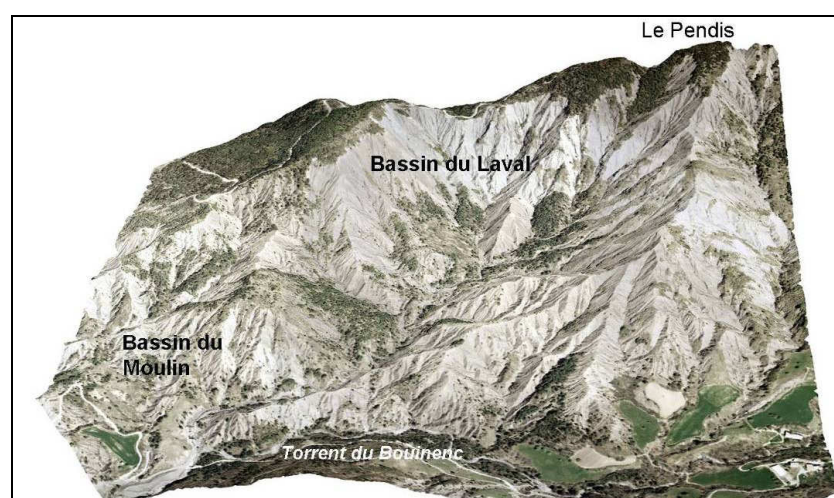


Figure II-10 : Drapage de l'orthophotographie sur le MNT du Laval et du Moulin (Mathys, 2006).

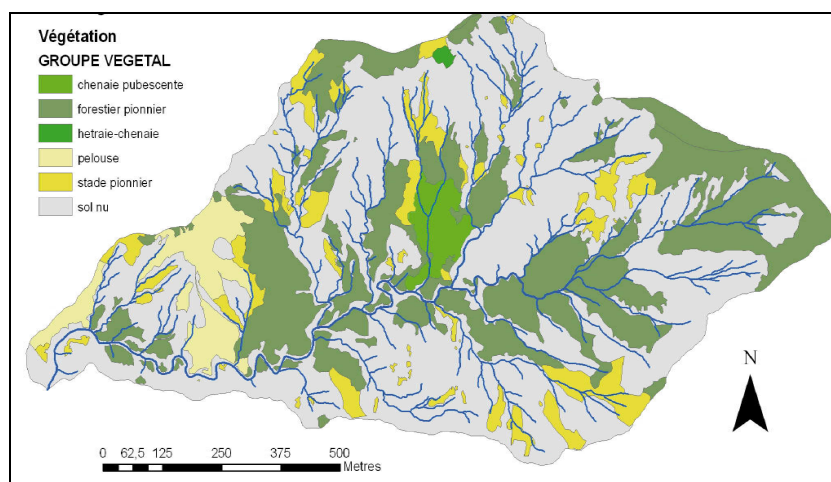


Figure II-11 : Carte de végétation du Laval (Mathys, 2006).



Figure II-12 : Formations géologiques du Laval (Mathys, 2006),
Les formations autochtones (Fau1 et Fau2) sont constituées par les marnes noires callovo-oxfordiennes ;
et les formations allochtones sont d'origine alluviale (Fal1, Fal4, Fal5 et Fal6),
ou gravitaire (Fal2 et Fal3).

A-3-2) Le Brusquet

Le Brusquet est un bassin versant de 108 hectares avec une pente moyenne de 53 %. Le bassin est recouvert à 87 % par une forêt de pins noirs (figures II-13 et 14) et est caractérisé par des sols peu épais développés au dépend des formations allochtones (matrice limono argileuse ou colluvions de marnes), ou autochtones (Brochot et Meunier, 1995). Le substrat autochtone est constitué de marnes et marno-calcaires datant du Toarcien, de l'Aalénien supérieur /inférieur et du Bajocien (figure II-15).



Figure II-13 : Zone aval du bassin versant du Brusquet (cliché, Y Graz).
Marnes du Toarcien (avant plan) et barres calcaires de l'Aalénien inf. (arrière plan).

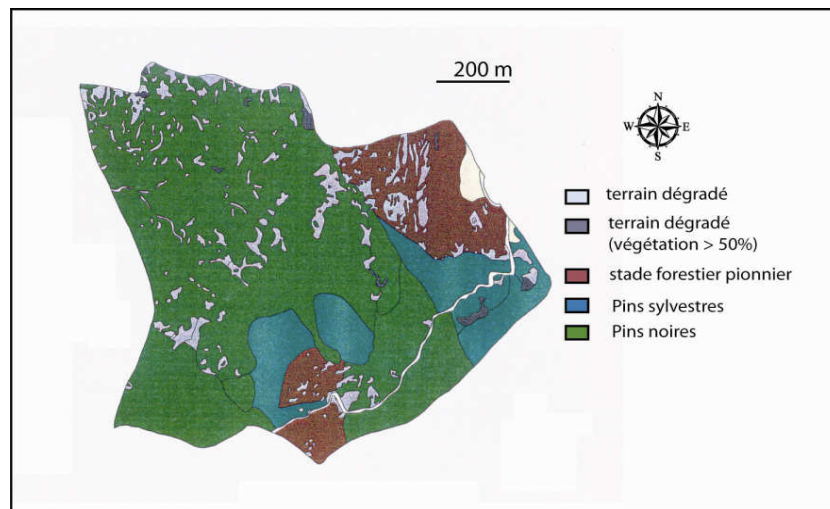


Figure II-14 : Carte de végétation du Brusquet (Vallauri, 1997a).

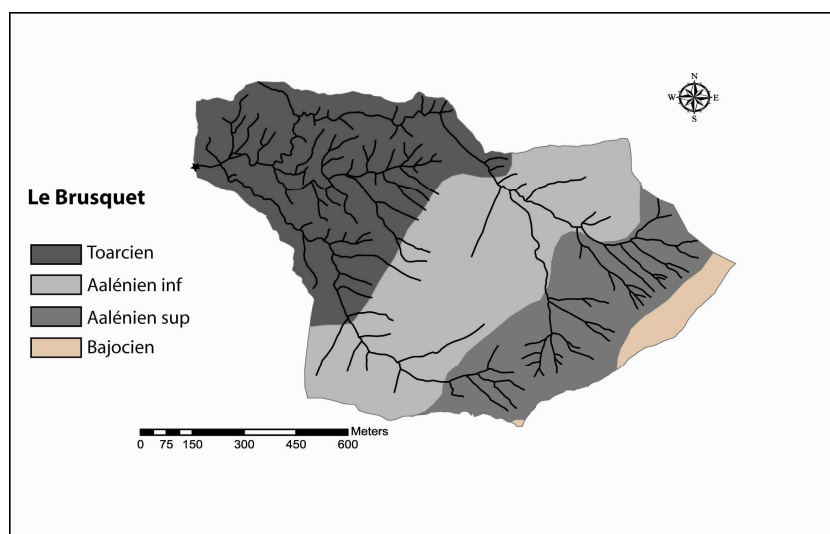


Figure II-15 : Formations géologiques du Brusquet.

A-3-3) Le Moulin

Le Moulin (figure II-16) est un bassin directement adjacent au Laval. Il possède une superficie de 8 hectares et une pente moyenne de 30 %. Le taux de végétation, de 46 %, est supérieur à celui du Laval (figure II-17). Le substrat est essentiellement constitué de terres noires callovo-oxfordiennes recouvertes par endroits par des formations allochtones d'épaisseurs métriques (figure II-18). Son réseau hydrographique est bien développé.

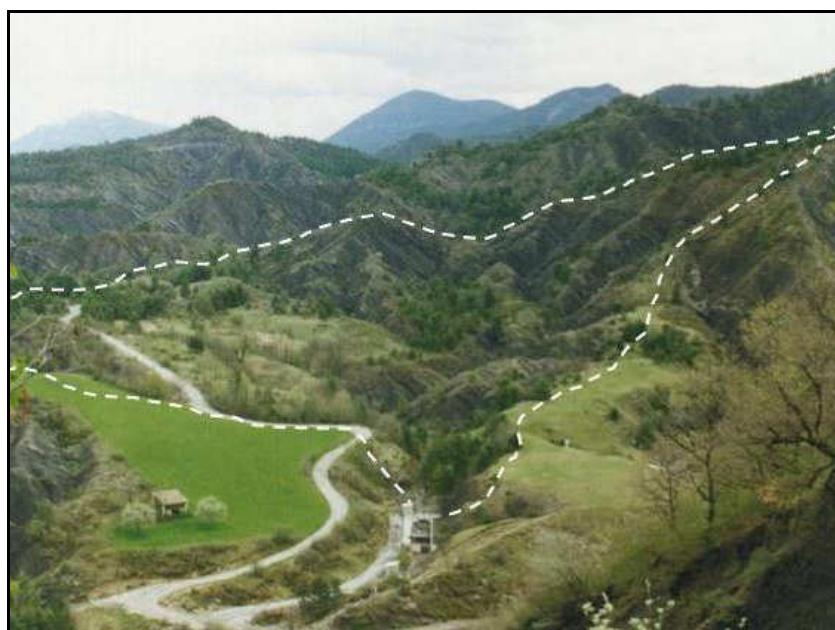


Figure II-16 : Bassin versant du Moulin, vue générale (Mathys, 2006).

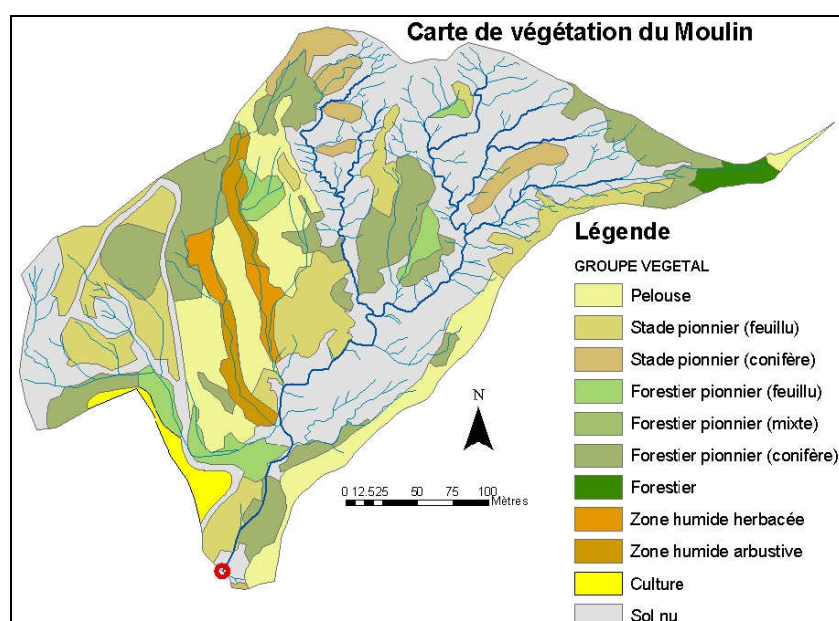


Figure II-17 : Carte de végétation du Moulin (Mathys, 2006).

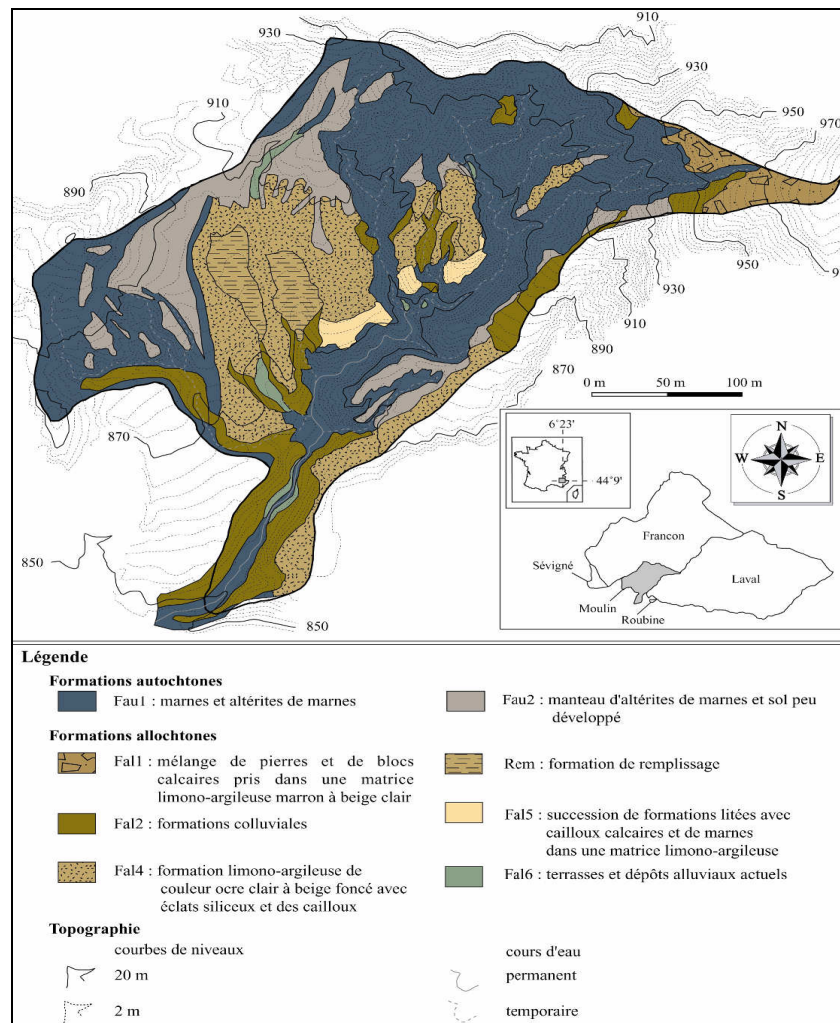


Figure II-18 : Formations géologiques du Moulin (Mathys, 2006).

A-3-4) La Roubine

La Roubine est un bassin versant de 0,133 hectares possédant une pente moyenne de 75 %. Ce bassin correspond à une ravine élémentaire (figure II-19) et présente un taux de végétation faible (21 %). Le substrat est exclusivement constitué de terres noires callovo-oxfordiennes.

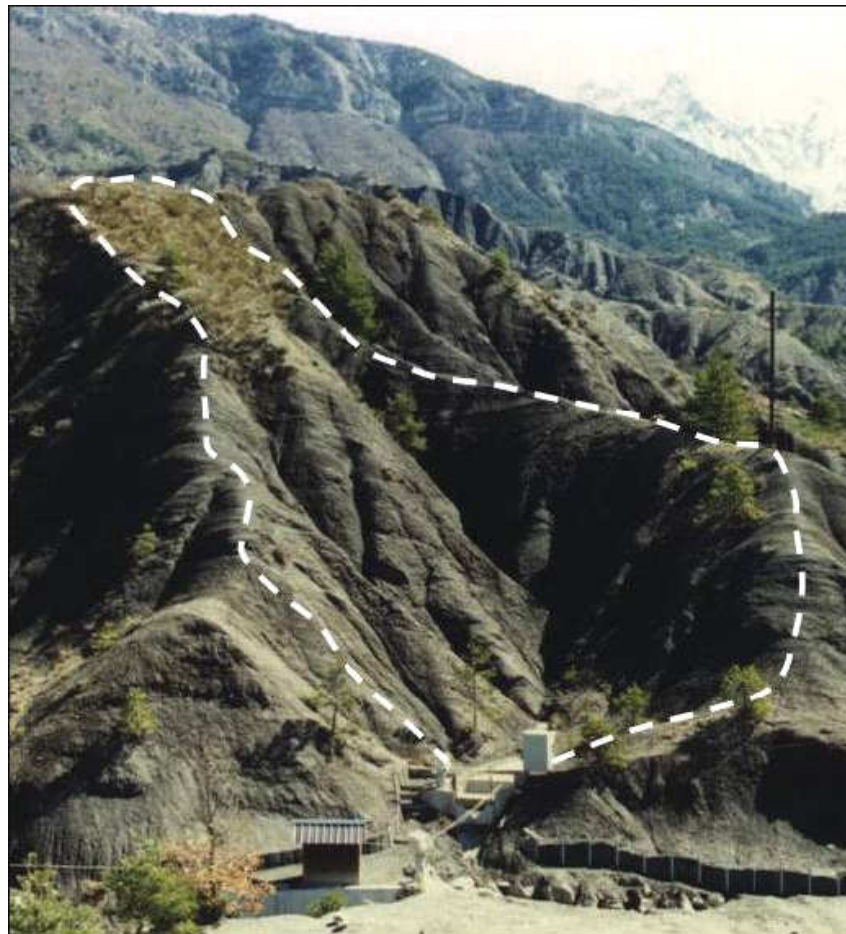


Figure II-19 : Vue par le nord du bassin de la Roubine (Mathys, 2006).

A-4) Equipement existant et mesures effectuées

L'équipement des bassins versants a été organisé par le Cemagref et s'est décliné en plusieurs phases entre 1983 et 1994 (Meunier *et al*, 1995 ; tableau II-2). Les bassins sont aujourd'hui équipés pour la mesure des pluies, des débits et des transports solides par charriage ou en suspension. Les pluies sont mesurées par cinq pluviographes répartis sur la zone étudiée (Laval, Sevine, Pompe, Pépinière et Blache, figure II-3). Les mesures des débits liquides et solides sont effectuées aux exutoires de chaque bassin (figure II-20) où a été construite une plage de dépôt permettant de mesurer les transports solides (charges de fond) et protégeant une station de mesure à l'aval. Au sein de chaque station se trouve un limnigraphe (Olivier et Pebay- Peyroula, 1995) permettant la mesure des hauteurs d'écoulement au sein d'une section de contrôle, ou d'un canal auto/jaugeur, tandis que la mesure des concentrations en sédiments fins (MES) est réalisée au moyen de divers procédés : prélèvements d'échantillons automatiques, procédés optiques (turbidimètres), et mesures de pression (Olivier et Juge, 1995).

Type de mesure	Poste	Début du suivi	Fin du suivi
Pluviographes	LAVAL	1983	
	SEVIGNE	1893	
	POMPE	1985	
	PEPINIERE	1987	
	BLACHE	1990	
Limnigraphes	ROUBINE	1983	
	LAVAL	1984	
	FRANCON	1986	1994
	BRUSQUET	1987	
	MOULIN	1988	
Plages de dépôt	ROUBINE	1983	
	LAVAL	1984	
	BRUSQUET	1988	
	MOULIN	1988	
Préleveurs	ROUBINE	1983	
	LAVAL	1985	
	FRANCON	1987	1990
	BRUSQUET	1988	
	MOULIN	1988	
Turbidimètres optiques	LAVAL	1995	
	MOULIN	1994	

Tableau II-2: Dispositifs de mesures et dates d'installation (Mathys, 2006).

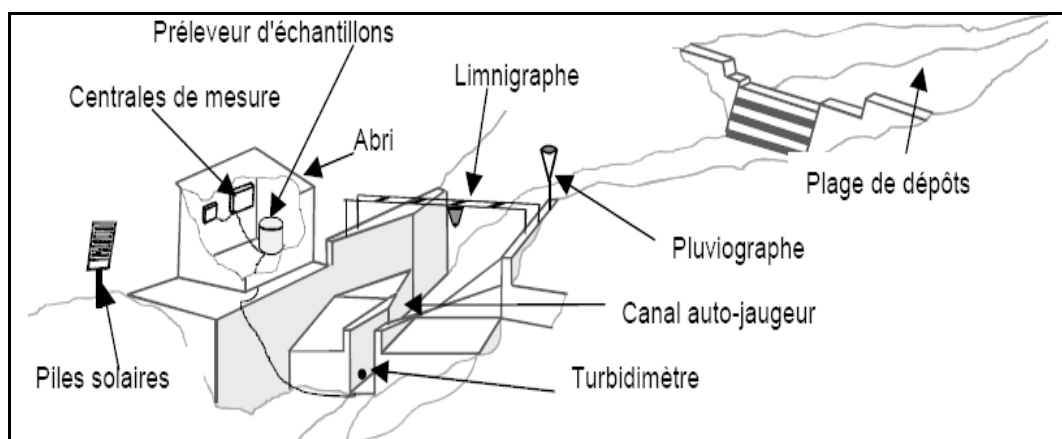


Figure II-20 : Dispositifs de mesures du bassin du Laval (Richard et Mathys, 1999).

B) Echantillonnage

L'ensemble des échantillons a été collecté dans le but de suivre le COF dans les différents compartiments des bassins versants (Roches, Altérites, Sols, Particules fluviales); ceci en intégrant les influences respectives du substrat, de la végétation et de la pente. Ont ainsi été prélevés, durant trois campagnes de terrain (la première en 2001 et les suivantes en 2006), cinq profils de sols, cinq profils Roches / Altérites et cinq autres profils Roches / Altérites / Sols¹⁵. A ceux-ci s'ajoutent quatre-vingt dix échantillons de particules fluviales : charges de fond (CF) et matières en suspension (MES). Les premières ont été prélevées dans les plages de dépôts des bassins du Laval et du Brusquet, et les secondes collectées par E. Olivier (Cemagref) à l'aide des préleveurs automatiques aux exutoires de bassins du Laval, du Brusquet et du Moulin. Ces prélèvements ont eu lieu au cours des années 2000, 2002, 2006, 2007 et début 2008 afin de tester les variabilités saisonnières et annuelles des particules fluviales. L'échantillonnage sera présenté bassin versant par bassin versant, compartiment par compartiment.

¹⁵ La justification de ces compartiments sera abordée après analyse de la phase minérale (cf. § IV-A-5-2).

B-1) Bassin versant du Laval

L'ensemble des profils et échantillons prélevés sur le Laval l'a été sur la formation autochtone callovo-oxfordienne. Cet échantillonnage comporte 9 échantillons de roches brutes, 76 échantillons d'altérites sous forme de plaquettes de marnes non altérées et 23 sous forme de terres fines argileuses issues de l'altération des roches, 14 échantillons de sols et 40 échantillons de particules fluviales. Leur localisation est présentée sur la figure II-21.

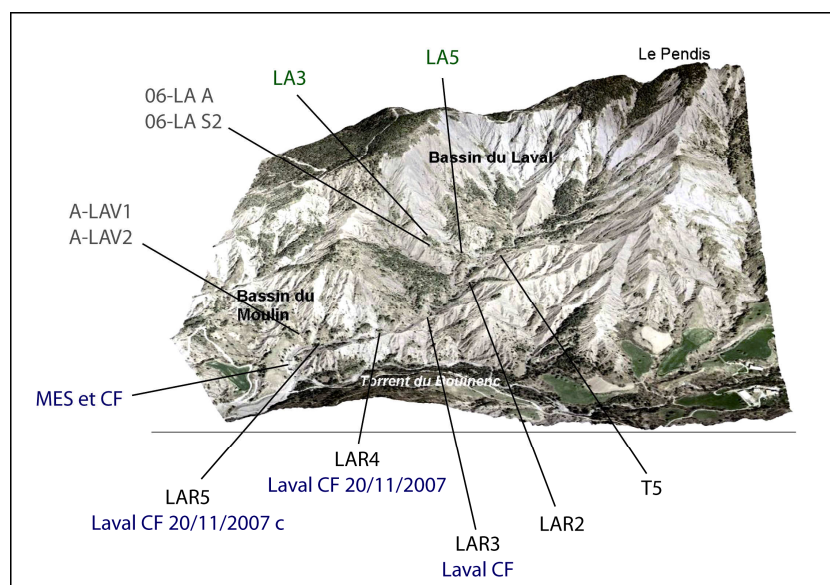


Figure II-21: Localisation des échantillons prélevés dans le bassin du Laval. Profils de sols (verts), profils d'altération (gris), roches (noir) et particules fluviales (bleu).

B-1-1) Les profils de sols

Deux profils de sols ont été prélevés en 2001. Nous avons, dans la mesure du possible, tenté de différencier les horizons¹⁶ de litières (OL), de fragmentations (OF), humiques (OH) et organo-minéraux¹⁷ (A) (figure II-22).

¹⁶ Les horizons O correspondent à l'accumulation de MO à la surface d'un sol. Se distinguent l'horizon OL, constitué de débris végétaux encore reconnaissables ; l'horizon OF, dans laquelle les débris organiques sont fragmentés ; et l'horizon OH, humifié, où plus aucune structure végétale n'est reconnaissable.

¹⁷ L'horizon A contient à la fois de la matière organique et de la matière minérale. Il est généralement le résultat d'un brassage mécanique par les organismes vivant dans le sol, tels que les vers et insectes.

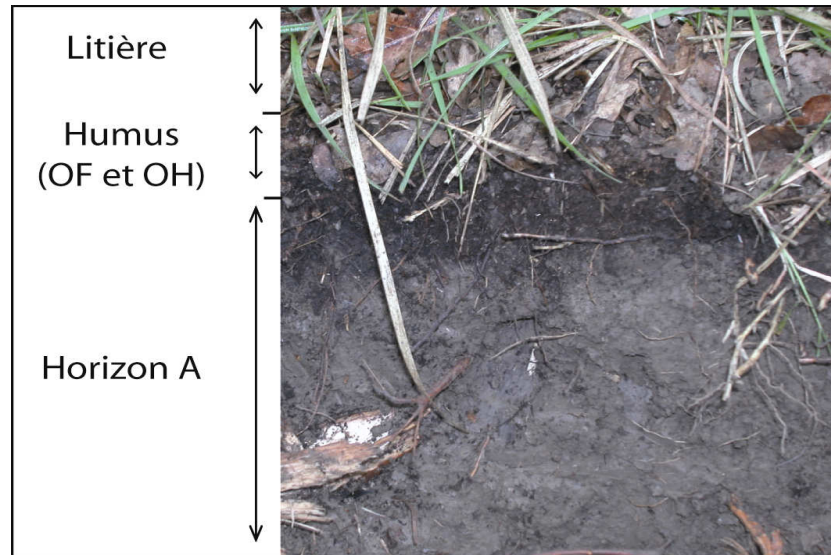


Figure II-22: Différents horizons de sols observés sur le site de Draix.

- Le profil LA3 est situé sous un couvert forestier assez marqué, essentiellement constitué d'herbacées, de pins sylvestres et de chênes. Quatre échantillons, correspondant aux horizons OL, OF, OH et A ont été prélevés.
- Le profil LA5 est situé sous un couvert forestier ouvert essentiellement constitué de pins sylvestres, de chênes, de graminées et de genets. Trois échantillons, OH, OH et A ont été prélevés.

B-1-2) Les profils d'altération

Ces profils sont au nombre de 5.

Au sein du compartiment Altérites, deux types d'échantillons ont été distingués : les échantillons de plaquettes de marnes non altérées (PL) et les échantillons de terres fines argileuses issues de l'altération de la roche (TF).

Campagne 2001 : Trois profils d'altération (A-AV1, A-LAV2 et A-LAV3) ont été prélevés durant cette campagne. Ils sont situés sur le pourtour d'une ravine élémentaire, directement à l'amont de la station de mesure du Laval (Figure II-23).



Figure II-23: Ravine élémentaire où les profils A-LAV1, A-LAV2 et A-LAV3 ont été prélevés (cliché J.E. Olivier).

- A-LAV1 (figure II-24) est un profil Altérites¹⁸ / Sols profond de 60 cm, situé en contexte végétalisé en bordure de pâturages. Ce profil est essentiellement composé d'argiles en surface, puis d'un mélange de plaquettes de marnes et d'argile clair partir de 30 cm de profondeur. Dix échantillons ont été prélevés, tous les six cm.

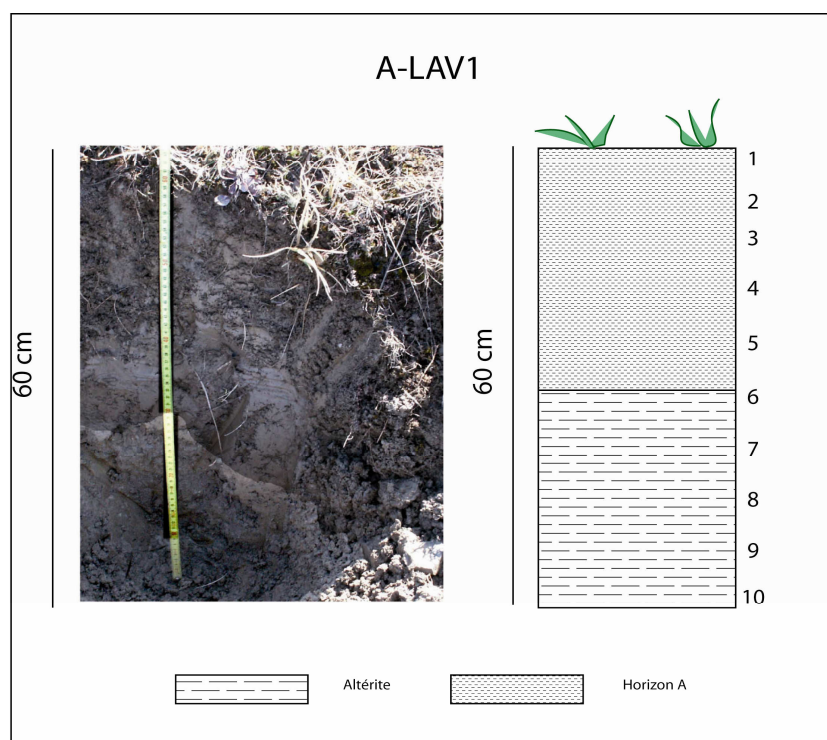


Figure II-24 : Profil A-LAV1 (cliché J.E. Olivier).

¹⁸ Les profils ont été creusés jusqu'à la roche brute et compacte. L'épaisseur de roche sue jacente, constituée de plaquettes de roches moins compactes plus ou moins altérées est définie comme altérite.

- A-LAV2 (figure II-25) est un profil Roches / Altérites profond de 30 cm situé en contexte plat et non végétalisé. Dix échantillons ont été prélevés (8 PL et 2 TF), tous les trois ou quatre cm.

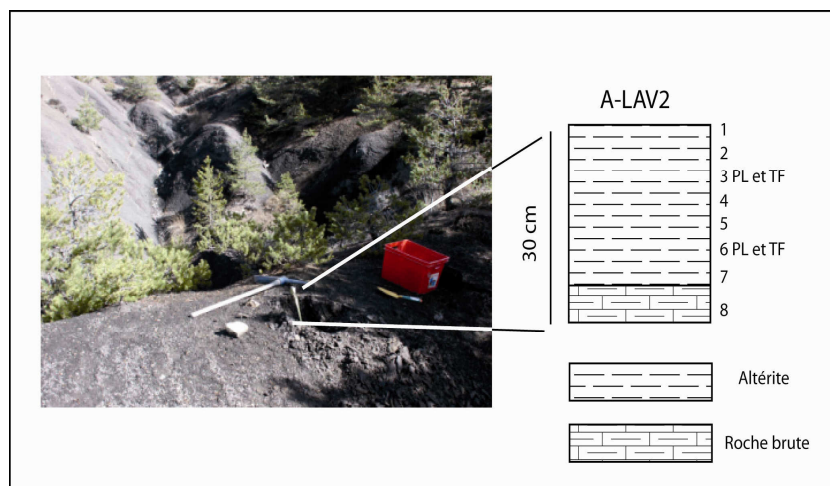


Figure II-25 : Profil A-LAV2 (cliché J.E. Olivier).

- A-LAV3 (figure II-26) est un profil Roches / Altérites profond de 40 cm, situé en contexte pentu et non végétalisé. Sept échantillons ont été prélevés, tous les cinq ou six cm.

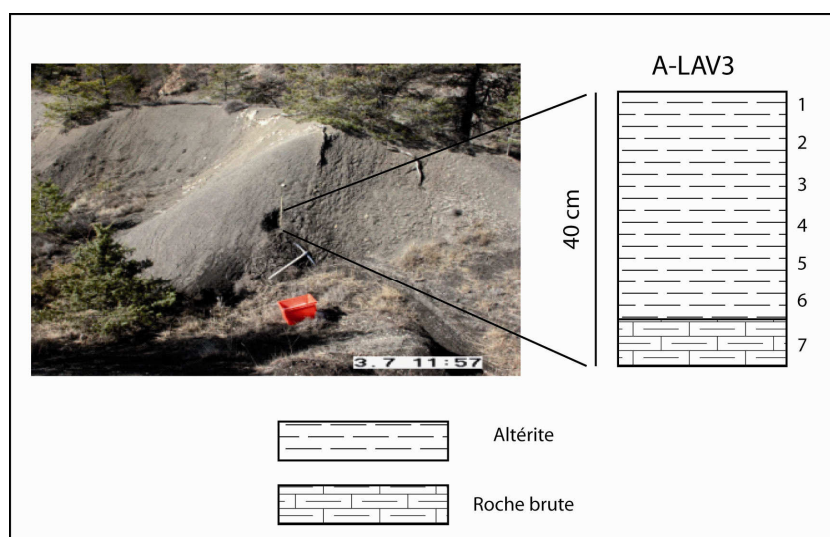


Figure II-26 : Profil A-LAV3 (cliché J.E. Olivier).

Campagne 2006 : Trois profils d'altération (06-LA A, LA A R et 06-LA S2) ont été prélevés durant cette campagne. Ils sont situés en sommet de crête (Figure II-27).



Figure II-27 : Localisation des profils 06- LA A et 06-LA S2 (cliché C. Di-Giovanni).

-06-LA A (figure II-28) est un profil Roches / Altérites profond de 80 cm, situé en sommet de crête dépourvue de végétation. Aucune phase argileuse n'est observée. Quinze échantillons ont été prélevés tous les cinq cm.

- LA A R (figure II-28) est situé au même endroit que le profil 06-LA A, mais les échantillons ont été prélevés six mois plus tard, afin d'observer les effets supposés de l'altération « in situ » sur le COF.

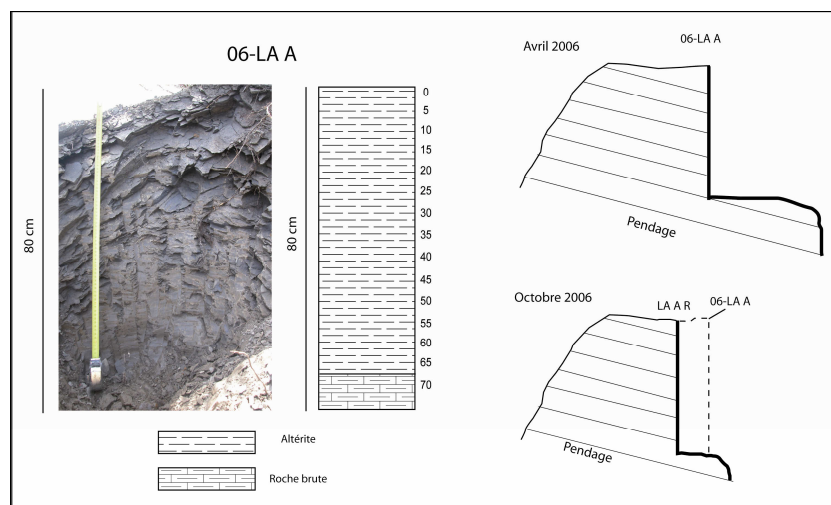


Figure II-28 : Profils 06-LA A et LA A R (cliché Y. Graz).

- 06-LA S2 (figure II-29) est un profil Roches / Altérites/ Sols voisin de 06 LA-A (Figure II-29). Ce profil, profond de 140 cm, est situé en sommet de crête, recouverte de sol et de végétation (pins sylvestres, thym et herbacées). Au sein de ce profil, se distinguent :
- un horizon de litière (feuilles chêne, pommes de pins, aiguilles de pins) peu développé.
- de 0 à 20 cm : un horizon A ;
- de 20 à 50 cm : un ensemble de plaquettes des terres noires altérées en feuillets fins entrecoupées de racines ;
- de 50 à 100 cm : un ensemble de plaquettes de terres noires bleutées plus compactes toujours entrecoupées de racines ;
- de 100 à 130 cm : un ensemble de plaquettes de terres noires bleutées entrecoupé de zones rougeâtres oxydées ;
- de 130 à 140 cm : des marnes très compactes non altérées.

Les terres fines sont très bien développées le long de ce profil. Ceci nous a permis de prélever 44 échantillons PL et TF tous les cinq cm de 20 à 140 cm de profondeur.

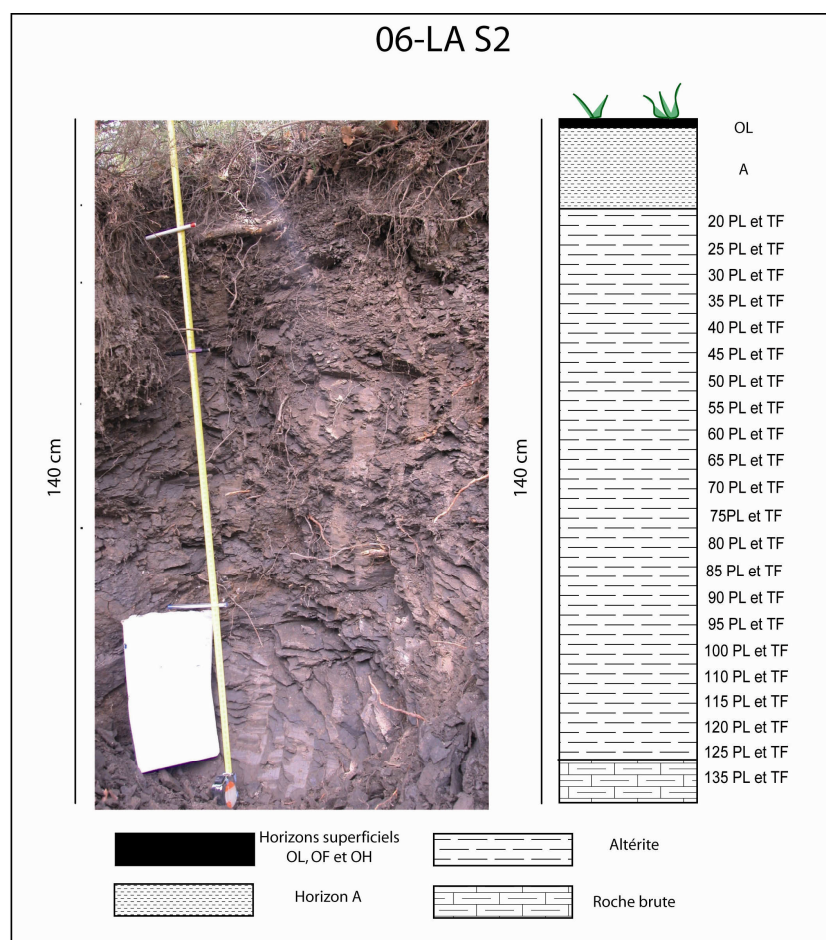


Figure II-29 : Profil 06 LA-S2 (cliché Y. Graz).

B-1-3) Les particules fluviales

34 échantillons de MES et 8 de CF ont été prélevés de 2000 à 2008 (tableau II-3). Plusieurs échantillons ont parfois été successivement prélevés durant une même crue, ils ont alors été notés a, b, c.....

MES Laval		CF Laval
Laval MES 19/03/2000	Laval MES 18/07/2006a	Laval CF 24/09/1999a
Laval MES 28/04/2000	Laval MES 08/09/2006	Laval CF 24/09/1999b
Laval MES 15/06/2000	Laval MES 15/09/2006	Laval CF 24/09/1999c
Laval MES 12/10/2000	Laval MES 25/09/2006	Laval CF 16/06/2000
Laval MES 03/05/2002a	Laval MES 20/10/2006a	Laval CF 28/04/2001
Laval MES 03/05/2002b	Laval MES 20/10/2006b	Laval CF 20/11/2006a
Laval MES 13/05/2002	Laval MES 20/10/2006c	Laval CF 20/11/2006b
Laval MES 24/05/2002	Laval MES 07/12/2006a	Laval CF 20/11/2006c
Laval MES 26/08/2002	Laval MES 07/12/2006b	
Laval MES 02/09/2002	Laval MES 04/06/2007	
Laval MES 05/09/2002	Laval MES 05/06/2007b	
Laval MES 23/10/2002	Laval MES 05/06/2007a	
Laval MES 06/07/2006	Laval MES 16/09/2007	
Laval MES 07/07/2006	Laval MES 22/11/2007	
Laval MES 12/07/2006b	Laval MES 11/01/2008a	
Laval MES 12/07/2006a	Laval MES 11/01/2008b	
Laval MES 18/07/2006b	Laval MES 11/01/2008c	

Tableau II-3: Echantillonnage des particules fluviales, bassin versant de Laval.

B-1-4) Autres échantillons

Cinq échantillons de roches brutes ont été prélevés le long du chenal principal (T5, LAR2, LAR3, LAR4 et LAR5).

B-2) Bassin versant du Brusquet

L'ensemble des profils et échantillons prélevés sur le Brusquet l'a été sur formation autochtone (roches en place). Cet échantillonnage comporte 11 échantillons de roches brutes, 35 échantillons d'altérites sous forme de plaquettes et 21 sous forme de terres fines, 23 échantillons de sols et 23 échantillons de particules fluviales. Leur localisation est présentée sur la figure II-30.

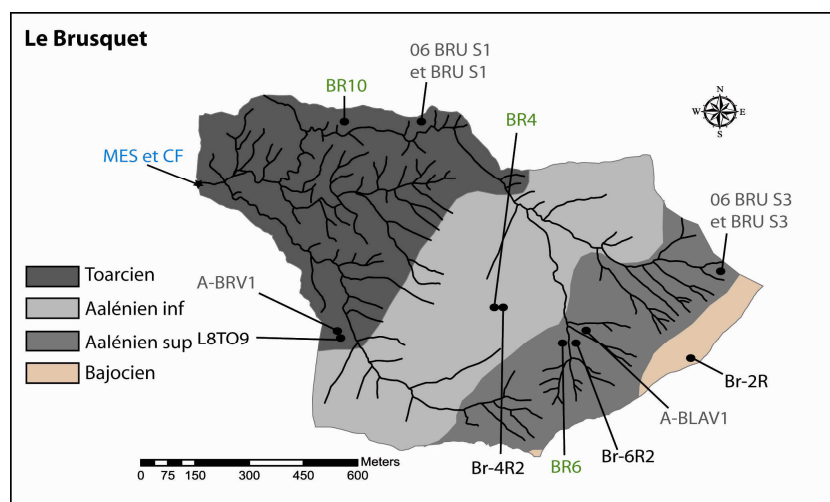


Figure II-30 : Localisation des échantillons prélevés dans le bassin du Brusquet, Profils de sols (verts), profils d'altération (gris), roches (noir) et particules fluviales (bleu).

B-2-1) Les profils de sols

Ces profils, prélevés en 2001, sont au nombre de 3 :

- Le profil BR4 est situé sous une forêt de pins noirs et s'est développé au détriment des marno-calcaires datant de l'Aalénien inférieur. Quatre échantillons, correspondant aux horizons OL, OF, OH et A ont été prélevés.
- Le profil BR6 est situé sous une forêt de pins noirs et de buis et s'est développé au détriment de marnes datant de l'Aalénien supérieur. Quatre échantillons, correspondant aux horizons OL, OF, OH et A ont été prélevés.

- Le profil BR10 est situé sous une forêt de pins noirs s'est développé au détriment de marnes datant du Toarcien. Deux échantillons, correspondant aux horizons OL, et A ont été prélevés.

B-2-2) Les profils d'altération

Ces profils sont au nombre de 6 :

Campagne 2001 : Deux profils d'altération ont été prélevés durant cette campagne sur formations marneuses Toarciennes (A-BRV1) et Aaléniennes inférieure (A-BLAV1).

- A-BRV1 (figure II-31) est un profil Altérite / Sols, profond de 40 cm situé en contexte plat et boisé. Développé au détriment de formations marneuses toarciennes, ce profil est un mélange de plaquettes de marne et d'argile. Dix échantillons (PL et TF) ont été prélevés tous les cinq cm, de la surface vers le fond.

- A-BLAV1 (figure II-31) est un profil Roche / Altérite / Sols, profond de 40 cm situé en contexte plat et boisé. Développé au détriment de formations marneuses de l'Aalénien supérieur, le profil est constitué de 15 cm d'horizons de sols (OH et A), suivis par 20 cm de plaquettes plus ou moins altérées, puis de roches compactes. Huit échantillons (PL et TF) ont été prélevés tous les cinq cm.

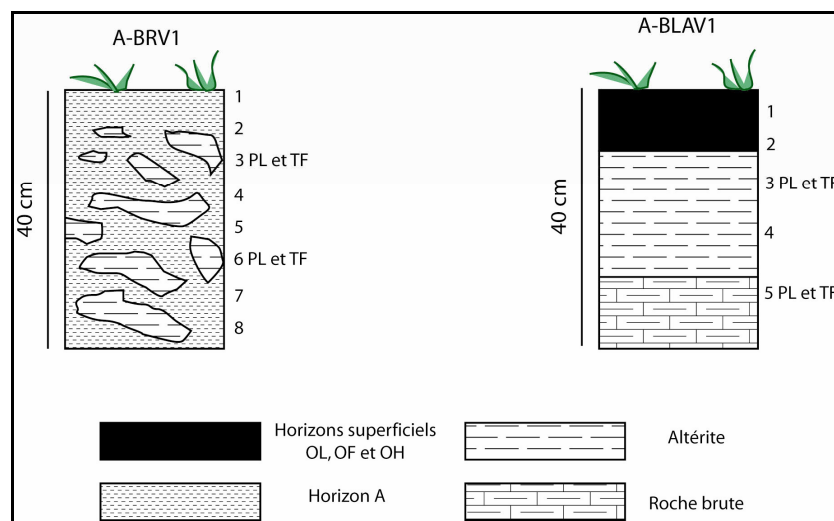


Figure II-31: Profils d'altération A-BRV1 et A-BLAV1.

Campagne 2006 : Quatre profils d'altération ont été prélevés durant cette campagne. Les deux premiers (06-BRU S1 et BRU S1 Lat) l'ont été sur marnes toarciennes (Figure II-32 a) et les deux autres (06-BRU S3 et BRU S3 Lat) sur marnes aaléniennes supérieures (Figure II-32 b).

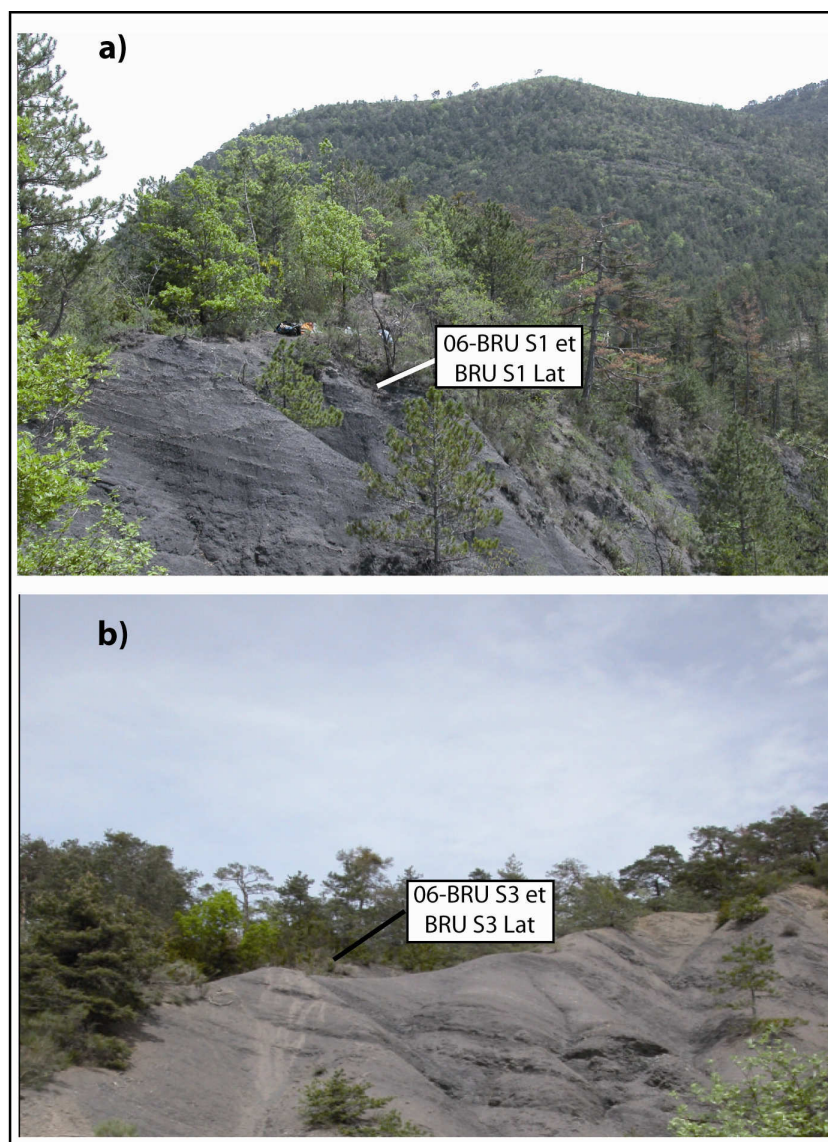


Figure II-32 : Localisation (a) des profils 06 BRU S1, BRU S1 Lat et (b) des profils 06 BRU S3, BRU S3 Lat.

- 06-BRU S1 (figures II-33) est un profil Roches / Altérites / Sols vertical de 70 cm situé au sommet d'une crête sous un couvert forestier ouvert essentiellement constitué de pins noirs et de chênes. Ce profil s'est développé au détriment de marnes toarciennes et nous distinguons :
- un horizon de litière (feuilles chêne, pommes de pins, aiguilles de pins) peu développé ;

- de 0 à 20 cm : un horizon A, meuble avec de nombreuses racines ;
- de 20 à 40 cm : un ensemble de plaquettes de roches claires au sein d'une matrice argileuse avec des racines ;
- de 40 à 60 cm : un ensemble de plaquettes marnes sombres ;
- de 60 à 70 cm : des marnes compactes non altérées.

Les terres fines sont très bien développées le long de ce profil, ce qui nous a permis de prélever dix échantillons de PL et six de TF de 20 à 70 cm de profondeur.

- BRU S1 Lat (figures II-33) est un profil latéral complémentaire partant de l'échantillon 06-BRU S1 prélevé à 50 cm de profondeur et qui suit une même lamine jusqu'à la surface. Cette lamine mesure 70 cm et six échantillons, distants de 10 cm, ont été prélevés sur cette longueur.

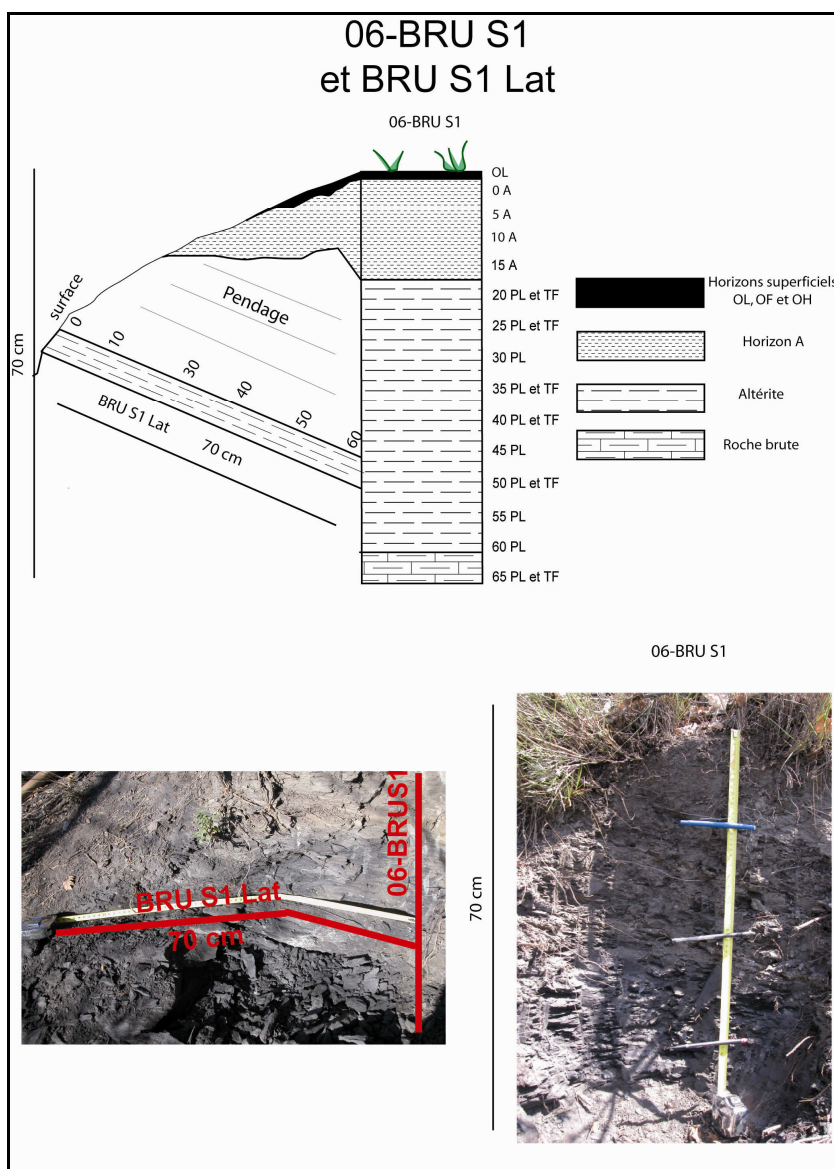


Figure II-33 : Profils d'altération 06-BRU S1 et BRU S1 Lat.

- 06-BRU S3 (figure II-34) est un profil d'altération Roche / Altérite vertical d'environ 45 cm de profondeur situé au sommet d'une crête sous un couvert forestier ouvert essentiellement constitué de pins noirs, de buis et d'herbacées. Ce profil s'est développé au détriment de formations marneuses datant de l'Aalénien supérieur, et la phase argileuse y est abondante. Quinze échantillons PL et TF ont été prélevés, tous les cinq cm.

- BRU S3 Lat (figure II-34) est un profil latéral complémentaire partant de l'échantillon 06-BRU S3 prélevé à 40 cm de profondeur et qui suit une même lamine jusqu'à un sol développé sous une végétation dense (pins noirs, buis, herbacées). Cette lamine mesure 80 cm. Huit échantillons de plaquettes de marnes, deux d'horizons A, et un pour chaque horizon OL, OF, OH ont été prélevés.

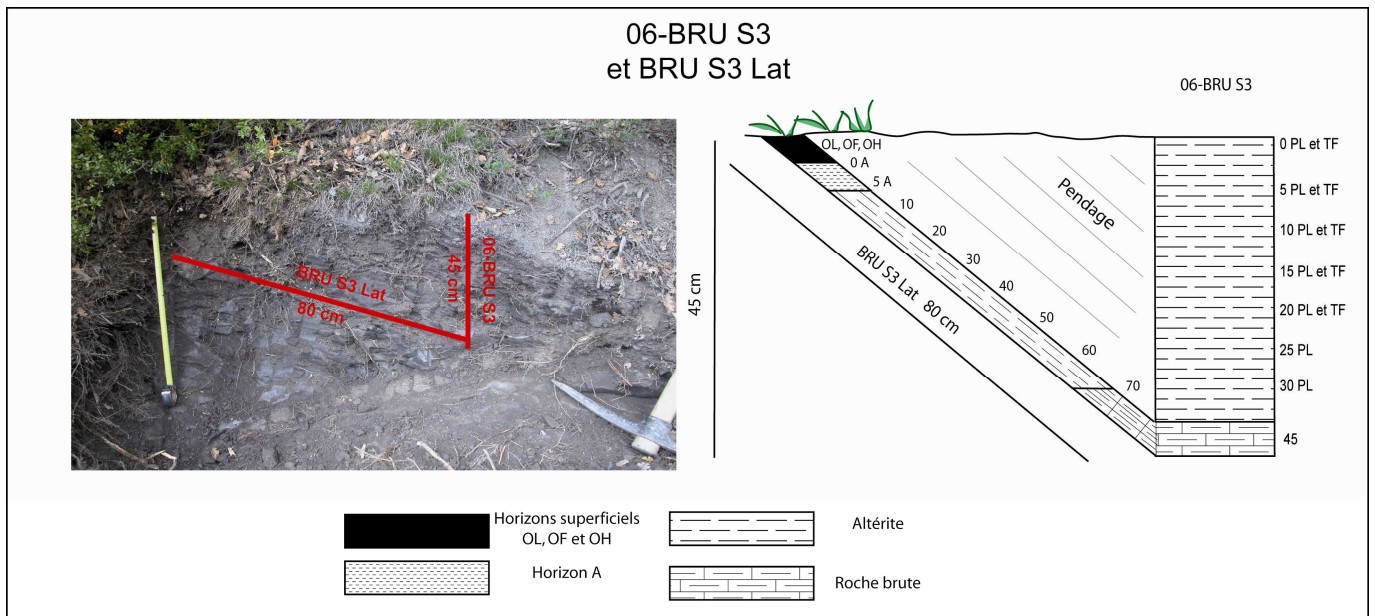


Figure II-34: Profils 06 BRU S3 et BRU S3 Lat.

B-2-3) Les particules fluviales

16 échantillons de MES et 7 de CF ont été prélevés de 1999 à 2008 (tableau II-4).

MES Brusquet	CF Brusquet
Brusquet MES 15/06/2000	CF Brusquet 24/09/1999 a
Brusquet MES 03/05/2002 a	CF Brusquet 24/09/1999 b
Brusquet MES 23/05/2002	CF Brusquet 24/09/1999 c
Brusquet MES 25/05/2002	CF Brusquet 24/09/1999 d
Brusquet MES 03/05/2002 b	CF Brusquet 28/04/2001
Brusquet MES 04/09/2002 a	CF Brusquet Toarcien 20/112006
Brusquet MES 04/09/2002 b	CF Brusquet Aalénien sup 20/112006
Brusquet MES 17/09/2002	
Brusquet MES 12/07/2006 a	
Brusquet MES 12/07/2006 b	
Brusquet MES 12/07/2006 c	
Brusquet MES 12/07/2006 d	
Brusquet MES 24/09/2006	
Brusquet MES 21/10/2006	
Brusquet MES 06/12/2006	
Brusquet MES 17/12/2006	

Tableau II-4 : Echantillonnage des particules fluviales, bassin versant du Brusquet.

B-2-4) Autres échantillons

Dix échantillons supplémentaires ont été prélevés : sept échantillons de roches brutes toarciennes (B1, B2, B3, B4 et B5, B6 et L8to9), un de roche brute aalénienne inférieur (Br-4R2), un de roche brute aalénienne supérieur (Br-6R2) et un de roche brute bajocienne (Br-2R).

B-3) Bassin versant du Moulin

Le bassin versant du Moulin est situé sur des marnes callovo-oxfordienne. Ce bassin ayant déjà été étudié (Di-Giovanni *et al*, 2000), aucun profil de sols ou d'altérite n'a été prélevé. Nous avons cependant échantillonné 27 MES de 2002 à 2008 (tableau II-5).

MES Moulin	MES Moulin
Moulin MES 03/05/2002	Moulin MES 08/09/2006 b
Moulin MES 13/05/2002	Moulin MES 5/09/2006 a
Moulin MES 05/08/2002	Moulin MES 15/09/2006 b
Moulin MES 27/08/2002 a	Moulin MES 24/09/2006
Moulin MES 27/08/2002 b	Moulin MES 20/10/2006 a
Moulin MES 02/09/2002	Moulin MES 20/10/2006 b
Moulin MES 05/09/2002	Moulin MES 07/12/2006
Moulin MES 12/09/2002	Moulin MES 05/06/2007 a
Moulin MES 06/07/2006 a	Moulin MES 05/06/2007 b
Moulin MES 06/07/2006 b	Moulin MES 23/11/2007
Moulin MES 12/07/2006	Moulin MES 12/01/2008 a
Moulin MES 08/09/2006 a	Moulin MES 12/01/2008 b

Tableau II-5: Echantillonnage des particules fluviales, bassin versant du Moulin.

C) Analyses conduites

Mettre en évidence la contribution fossile dans les différents compartiments étudiés nécessite de savoir distinguer et caractériser le COF du COR dans chaque échantillon. Les différentes études présentées dans le chapitre I utilisent des analyses très diverses : optiques, géochimiques, isotopiques, moléculaires.... ayant chacune ses avantages, mais aussi ses inconvénients. Les paragraphes suivants ont pour but de présenter les analyses retenues pour cette étude, tout en intégrant les notions d'apports et de limites.

C-1) Les méthodes optiques

C-1-1) Le palynofacies

Le palynofacies est une méthode développée par les palynologues (Combaz, 1964) permettant l'observation de la fraction organique au microscope suite à la dissolution de la phase minérale. C'est ce type d'étude qui a permis, pour les premières fois, de mettre en évidence la présence de COF dans les compartiments récents, notamment au sein de sédiments marins (Combaz, 1974 ; Tyson, 1995). Cette méthode est couramment utilisée dans l'études de sédiments récents (marins ou lacustres) et sols car elle permet de rendre compte de la diversité de la MO, fossile ou récente, au sein d'un échantillon (Lallier Verges *et al*, 1993, 1998 ; Sifeddine *et al*, 1995 ; 1996 ; Di-Giovanni *et al*, 1997 ; 1998 ; 1999 a,b,c ; Lukge *et al*, 1999 ; Noel, 2001, Valdés *et al*, 2004 ; Sebag *et al*, 2005, 2006 ; Comont *et al*, 2006 ; Da Costa Gurgel, 2008 ; Gallaud, 2008) . Elle autorise ainsi le suivi de chaque type de particule observée lors des transferts entre les différents compartiments étudiés.

Le protocole analytique est le suivant. Après la destruction de la phase minérale des échantillons (carbonates et silicates) via une succession d'attaques chimiques (HCL, HF), le concentré organique obtenu est monté entre lame et lamelle, destiné à l'observation en lumière naturelle transmise. Les différentes particules observées sont définies à partir de différents critères morphologiques et texturaux (Combaz, 1980, Tyson, 1995, Sebag *et al*, 2005 ; 2006). La quantification relative des surfaces de chaque type de particules organiques est réalisée

pour chaque échantillon sous objectif X50 à immersion d'huile à l'aide d'un quadrillage de maille élémentaire de 10 μm placé dans un oculaire d'un microscope photonique de type leica® DMR XP. Ce comptage devient significatif à partir de 200 surfaces élémentaires comptabilisées, le pourcentage d'erreur devenant inférieur à 5% (Noel, 2001). Bien que ce type de préparation ne soit pas le mieux adapté, les observations ont aussi été menées en lumière réfléchie naturelle ou sous excitation UV afin de caractériser le caractère réfléchissant ou fluorescent des particules. Près de 200 échantillons ont été soumis à cette analyse.

Cette méthode permet de rendre compte de la diversité de la MO, fossile ou récente, au sein d'un échantillon. Elle n'autorise par contre que l'observation de la fraction non acido-soluble de la MO et l'obtention des % surfaciques pour chaque type de particules (semi-quantification¹⁹).

C-1-2) Mesure du pouvoir réflecteur

Le pouvoir réflecteur, ou réflectance, d'un matériau est un rapport d'intensité entre la lumière réfléchie et la lumière incidente exprimée en pourcentage (R_0 %). Ce paramètre est synonyme du degré de maturation thermique des matières organiques terrestres, et permet notamment de classer les charbons selon un rang (Alpern in Durand, 1980 ; Robert in Durand, 1980).

Pour notre étude, 31 échantillons, répartis sur les profils 06-LA A, 06-LA S2, 06-BRU S1 et 06-BRU S3 (échantillons PL, TF et horizons A), ainsi que des échantillons de MES du Laval et du Brusquet ont été soumis à cette analyse. En raison de leurs faibles teneurs en Corg, les mesures ont été effectuées sur des concentrés palynologiques, semblables à ceux obtenus pour le palynofacies, mais montés en sections polies. Les mesures ont été obtenues selon la méthode standard élaborée par l'International Commity of Coal Petrology » (ICCP, 1993), à l'aide d'un microscope photonique de type leica® DMR XP, équipé d'un monochromateur ainsi que d'un photomètre émettant un faisceau de longueur d'ondes de 546 nm. Les observations sont effectuées sous immersion d'huile et les mesures étalonnées grâce à un standard diamant ($R_0 = 5,23$ %). Le paramètre R_0 est donné par la formule de Fresnel-

¹⁹ Une diminution du % surfacique d'un type de particule, d'un échantillon à l'autre, peut traduire soit une perte de cette particule, soit sa dilution, liée à l'apparition ou à l'augmentation d'autres types de particules.

Beer, où n représente l'indice de réfraction du matériau, k , l'indice d'absorption et N l'indice de réfraction de l'huile.

$$R0 = \frac{(n - N)^2 + n^2 k^2}{(n + N)^2 + n^2 k^2}$$

Avec n : indice de réfraction du matériau

K : indice d'absorption

N : indice de réfraction de l'huile

100 mesures sont normalement nécessaires à l'acquisition d'une valeur moyenne représentative. Cependant, le faible nombre de particules de MO des échantillons étudiés n'a pas toujours permis d'atteindre ce seuil, les mesures étant parfois effectuées sur 20 à 60 points (11 d'échantillons concernés).

Cette méthode permet d'estimer le degré de maturation thermique des particules réfléchissantes au sein de chaque échantillon, et ainsi de mettre en évidence la présence de MOF dans les différents compartiments. Elle ne permet par contre pas l'analyse de l'ensemble du matériel organique, ni son suivi quantitatif lors de son transfert d'un compartiment à un autre.

C-2) Les méthodes géochimiques

C-2-1) La pyrolyse rock-Eval

A l'origine, la pyrolyse Rock-Eval (RE) a été développée par l'Institut Français du Pétrole (IFP) dans un but de prospection pétrolière. Elle permet de reconnaître les grands types de roches mères, leurs potentiels pétrologènes ainsi que leurs degrés d'évolution thermique (Espitalié *et al*, 1977, 1985 ; Lafargue *et al*, 1998 ; Behar *et al*, 2001). Cette méthode permet par ailleurs de fournir rapidement différentes informations sur le contenu organique des roches, en termes de quantité et de qualité. Elle a, depuis quelques années, été utilisée, pour sa simplicité de manipulation et l'absence de traitement chimique préalable, dans le cadre de l'étude de sédiments récents, de sols ou de particules fluviales et tourbes (Di-Giovanni *et al*, 1998 ; Noel, 2001 ; Disnar *et al*, 2003, 2008 ; Jacob, 2003 ; Sebag *et al*,

2005 ; Hetényi *et al*, 2005 ; Copard *et al*, 2006 ; Steinmann *et al*, 2006 ; Marchand *et al*, 2008). 285 échantillons ont été soumis à cette analyse (Rock-Eval 6 - RE6).

L'analyse comprend deux phases successives :

1) L'échantillon (100 mg environ) préalablement broyé, est placé dans une nacelle, puis installé dans un four à pyrolyse sous atmosphère inerte (N₂). Il est soumis à une augmentation de température de 30°C/min entre deux paliers de 3 minutes à 250 et à 650°C. Durant cette pyrolyse, un capteur infrarouges et un capteur FID (Flame Ionization Detector) mesurent respectivement les gaz CO₂ et CO, ainsi que les composés hydrocarbonés (HC) libérés. L'intégration des signaux obtenus entre certaines bornes de température permet de déterminer les principaux paramètres suivants (figure II-35) :

- S1 : correspond aux HC libres libérés pendant le palier à 200°C ;
- S2 : correspond aux HC libérés par craquage de la matière organique lors de la montée en température de la phase de pyrolyse ;
- S3 et S3CO : CO₂ et CO libérés par la décomposition de la MO durant la pyrolyse (du début de l'analyse, jusqu'à respectivement 400 et 550°C) ;
- S3' et S3'CO : CO₂ et CO libérés par la décomposition thermique des carbonates (respectivement à partir de 400 et 550°C) ;
- Tpeak : température (°C) correspondant la quantité maximum d'HC libérés.

2) Le résidu carboné de la pyrolyse est ensuite introduit dans un four à oxydation. Un palier de 3 minutes est réalisé à 400°C, suivi d'une montée de la température de 30°C/min jusqu'à 750°C, température à laquelle un second palier est appliqué. Un capteur infrarouge mesure le CO₂ et le CO libérés. L'intégration des courbes d'émission se fait de la façon suivante (figure II -35) :

- S4CO₂ et S4CO : CO₂ et CO libérés par la décomposition de la MO durant l'oxydation (du début de l'analyse, jusqu'à respectivement 650 et 750°C).
- S5 : CO₂ libéré par la décomposition thermique des carbonates (à partir de 650°).

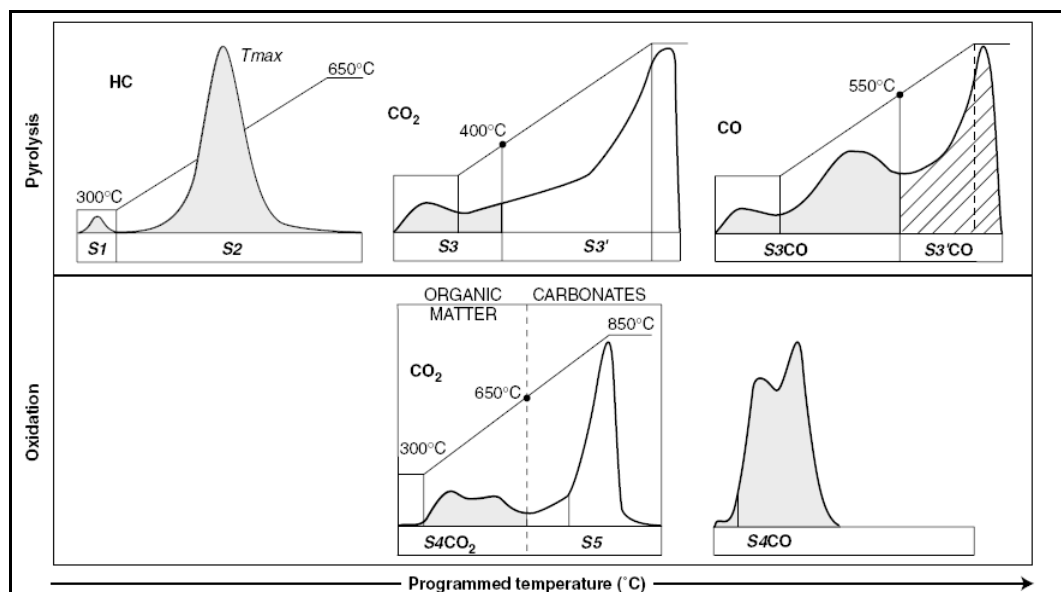


Figure II-35 : Courbes d'émission et bornes d'intégration des paramètres de bases de la pyrolyse Rock-Eval (Behar et al, 2001)

L'intégration des différents signaux obtenus permet l'obtention des paramètres suivants (Annexe-1) :

- Le Carbone Organique Total (COT) en % pondéral du sédiment.
- L'Indice d'Hydrogène (IH), qui est la proportion d'effluents hydrocarbonés émis durant la pyrolyse (S2) rapportée au COT. Ce paramètre est exprimé en $\text{mg HC.g}^{-1}\text{COT}$ et représente la richesse en hydrogène du contenu organique d'un échantillon.
- L'Indice d'Oxygène (IO), qui représente la quantité d'oxygène provenant de la matière organique ramenée au COT. Ce paramètre est exprimé en $\text{mg de CO}_2.\text{g}^{-1}\text{COT}$.
- Le Tmax, correspond au Tpeak diminué de 30°C. Cette correction est effectuée afin de concorder avec le paramètre fourni par les précédentes versions du Rock-Eval pour lesquelles la température mesurée était d'environ 30°C inférieure à celle à laquelle était effectivement porté l'échantillon.

La pyrolyse Rock-Eval est une méthode rapide permettant une estimation quantitative et qualitative du CO contenu dans les échantillons. Cette analyse s'effectue par contre sur le sédiment total (bulk) et permet uniquement d'obtenir des résultats moyennés dans le cas de mélanges de MO d'origines diverses.

C-2-2) Le rapport C / N

Le rapport carbone sur azote (C/N) est généralement utilisé par les pédologues comme indicateur de la biodégradabilité d'un échantillon ; celle-ci étant d'autant plus forte que les teneurs en N sont importantes (Duchaufour, 2001). Cependant, ce rapport a aussi été utilisé dans de nombreuses études portant sur le transfert de Corg par les rivières vers les océans, notamment dans celles s'intéressant au transfert de COF (Massiello et Druffel, 2001 ; Leithold et Blair, 2001 ; Gomez *et al*, 2003 ; Blair *et al*, 2003,2004 ; Wakeham et al, 2004 ; Leithold *et al*, 2006 ; Hilton *et al*, 2008). Sa valeur, différente selon les sources de Corg, peut en effet être indicatrice de la présence de COF au sein de sédiments récents (faibles rapports C/N, de l'ordre de 10).

Pour notre étude, trente cinq échantillons ont été soumis à cette analyse²⁰, cinq échantillons représentatifs de chaque roche (Toarcien : L8to9, Aalénien inférieur : Br-4R2, Aalénien supérieur : Br-6R2, Bajocien : Br-2R et Callovo-Oxfordien : T4), 10 échantillons de particules fluviatiles (CF et MES) échantillonnés en 2000 et 2001 aux exutoires du Brusquet et du Laval, ainsi que 15 échantillons répartis sur les profils de sols LA3, LA5 ; BR4, BR6 et BR10, d'altération A-LAV1, A-LAV2 et A-LAV3. Après broyage et décarbonatation des échantillons, les mesures ont été effectuées sur un spectromètre de masse à flux continu VG-Isochrom EA (standard utilisé : $\delta^{13}\text{CPDB}$, Graphite IAEA USGS-24 carbone /azote, Sulfanilamide Carlo Erba).

Le C/N est un paramètre permettant de distinguer différents groupes de MO selon leurs natures et origines. Cependant, tout comme l'analyse Rock-Eval, cette mesure s'effectue sur le « bulk » et permet uniquement d'obtenir des résultats moyennés dans le cas de mélanges de MO d'origines diverses. De plus, l'utilisation de ce rapport comme indicateur de COF peut se révéler risquée car il est connu pour évoluer, et globalement diminuer, lors de la dégradation de la MOR (Duchaufour, 2001), se rapprochant ainsi des valeurs généralement mesurées pour la MOF.

²⁰ Ces analyses ont été effectuées par J. Leveque assisté de M.J. Milloux au laboratoire GEOSOL (Géochimie des Interfaces Sol-Eau), UMR INRA/Université de Bourgogne.

C-3) Les méthodes isotopiques

C-3-1) $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$

Le carbone terrestre est majoritairement constitué des isotopes stables ^{12}C (98,9% environ) et ^{13}C (1,1% environ). La variation du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, selon l'objet étudié, est mesurée par le $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$. Ce paramètre représente la déviation du rapport isotopique par rapport à un standard international, le PDB (rostre de bélemnite de la formation géologique de Pee Dee en Caroline du Sud) et évolue de +5‰ pour le CO_2 dissous dans les océans à -32 ‰ pour certain végétaux terrestres (Trumbore et Druffel, 1995 ; Rotaru *et al* 2006) (Figure II-36).

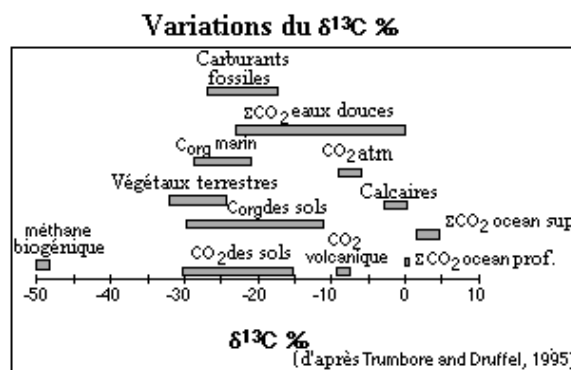


Figure II-36 : Variation du $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ selon différentes formes de carbone (Trumbore et Druffel, 1995).

Le $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ a couramment été utilisé dans les études présentées dans le premier chapitre, afin de caractériser le contenu organique de sédiments récents (Eglinton *et al*, 1997 ; Dickens *et al*, 2004a,b ; Wakeham *et al*, 2004), de sols et altérites (Lichfouse *et al*, 1997a,b, Keller *et al*, 1998 ; Petsch *et al*, 2001b, 2003), ou de la charge transportée par les rivières (Massiello et Druffel, 2001 ; Raymond et Bauer, 2001, 2004 ; Leithold et Blair, 2001, Gomez *et al*, 2003 ; Blair *et al*, 2003, 2004 ; Wakeham *et al*, 2004 ; Komada *et al*, 2005, Leithold *et al*, 2006 ; Hilton *et al*, 2008). A l'instar du C/N, le $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ est parfois utilisé comme traceur de la source (marine, terrestre ou fossile) du matériel organique au sein d'un échantillon. Les 35 échantillons soumis à cette analyse sont les mêmes que ceux soumis à l'analyse C/N²¹.

²¹ Ces analyses ont été effectuées par J. Leveque assisté de M.J. Milloux au laboratoire GEOSOL (Géochimie des Interfaces Sol-Eau), UMR INRA/Université de Bourgogne.

Le $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ est un paramètre permettant de distinguer les différentes MO selon leurs sources respectives. Tout comme la pyrolyse Rock-Eval et le C/N, cette mesure s'effectue sur le « bulk » et permet uniquement d'obtenir des résultats moyennés dans le cas de mélanges de MO d'origines diverses. De plus, l'utilisation du $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ comme traceur de matériel fossile peut se révéler risquée car des sources différentes peuvent délivrer des valeurs identiques²².

C-3-2) Âges radiocarbones

Le ^{14}C est un isotope radioactif du carbone, formé dans la haute atmosphère par des réactions initiées par le rayonnement cosmique. Le rapport $^{14}\text{C} / \text{C total}$ d'un organisme vivant, identique à celui existant dans l'atmosphère, va chuter suite à la mort de ce dernier selon une loi exponentielle caractérisée par une demi-vie de 5734 ans. L'utilisation de cette loi permet de dater un échantillon jusqu'à 50000 ans environ, mais a aussi contribué à mettre en évidence la présence de COF dans les sédiments récents (Eglinton *et al*, 1997 ; Dickens *et al*, 2004b ; Wakeham *et al*, 2004), les sols et altérites (Lichfouse *et al*, 1997a,b ; Petsch *et al*, 2001b, 2003) et dans les flux de COP et COD de rivières (Kao et Liu, 1996 ; Massiello et Druffel, 2001 ; Raymond et Bauer, 2001, 2004 ; Leithold et Blair, 2001 ; Blair *et al*, 2003, 2004 ; Wakeham *et al*, 2004 ; Komada *et al*, 2005, Leithold *et al*, 2006 ; Hilton *et al*, 2008).

Trois échantillons ont été sélectionnés pour cette analyse, un horizon A situé au sommet du profil 06-La S2 et 2 MES, prélevées le 12/07/06 aux exutoires des bassins du Laval et du Brusquet. Ces échantillons, respectivement nommés Poz-27100, Poz-27099 et Poz-27098, ont été analysés au Poznań Radiocarbon Laboratory (Pologne) par spectrométrie AMS (Acceleration Mass Spectrometry).

Les âges radiocarbones permettent de mettre en évidence la présence de carbone ancien au sein d'un échantillon. Cette mesure s'effectue sur le « bulk » et permet uniquement d'obtenir des résultats moyennés dans le cas de mélanges de MO d'origines diverses.

²² Cette approche est par exemple possible dans l'étude du bassin de l'Eel river, où les sources fossiles, terrestres et marines ont des valeurs différentes (respectivement -24,3‰, -26,5‰ et -21‰, Blair *et al*, 2004), mais il se révèle impossible de faire cette distinction dans le cas de l'estuaire de la rivière Santa Clara, où le $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ de la source fossile (-21‰) est comparable à celui la source marine (Komada *et al*, 2005).

C-4) Les méthodes moléculaires

Le couplage chromatographie et spectrométrie de masse (GC-MS), consiste en l'analyse structurale des molécules organiques préalablement extraites à l'aide de divers solvants. Ces dernières sont ensuite séparées selon leurs tailles au sein du chromatographe, puis analysées par le spectrographe, permettant ainsi leur identification. Dans les études présentées dans le premier chapitre, les analyses moléculaires ont contribué à la caractérisation de la MO et à la mise en évidence de MOF au sein de sédiments récents (Eglinton *et al*, 1997 ; Wakeham *et al*, 2004) et de sols (Lichfouse *et al*, 1997a,b). Elles ont aussi permis de mettre en évidence l'évolution différentielle des différents composés organiques fossiles lors de leur altération (Chang et Berner, 1998, 1999 ; Petsch *et al*, 2001b, 2003).

Pour notre étude, vingt trois échantillons ont été soumis à cette analyse : deux échantillons représentatifs des roches du Toarcien et de l'Aalénien supérieur (L8to9 et Br-6R2), ainsi que vingt et un échantillons (PL et TF) répartis sur les profils A-LAV1, A-LAV2, A-LAV3, A-BRV1 et A-BLAV1²³. Les échantillons sont lyophilisés, broyés avant de procéder à l'extraction à l'aide de dichlorométhane. L'extrait organique ainsi obtenu est ensuite fractionné par chromatographie liquide en constituants aliphatiques, aromatiques et polaires²⁴. L'analyse par couplage chromatographie et spectrométrie de masse des composés aliphatiques et aromatiques est effectuée sur un chromatographe gazeux HP5890 serie II, couplé à un spectrographe de masse HP5972A.

Cette méthode permet de rendre compte de la diversité de la MO, fossile ou récente, au sein d'un échantillon, et permet aussi une appréciation de l'évolution qualitative lors de la dégradation de cette MO. Elle ne concerne par contre que la fraction extractible de la MO, parfois minoritaire.

²³ Ces analyses ont été effectuées par P. Faure, R. Michels, M. Elie, au laboratoire G2R (Nancy).

²⁴ Un hydrocarbure présentant un moment dipolaire significatif est considéré comme polaire.

C-5) Spectrométrie d'émission Plasma à Couplage Inductif (ICP-OES)

La spectrométrie d'émission plasma à couplage inductif permet le dosage des éléments majeurs SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O et P_2O_5 . Pour cela, 100 mg d'échantillon finement broyés, et mélangés avec 250 mg de LiBO_2 (fondant), sont fondus à 1000°C pendant 5 minutes sous argon. La perle produite est ensuite mise en solution (acide nitrique) et pulvérisée au sein d'un plasma d'argon dont la température avoisine $10\,000\text{ }^\circ\text{K}$. Ceci permet 1) la dissociation de la matière en atomes et ions libres et 2) l'excitation de ces atomes qui, en retournant à un état moins énergétique (désexcitation), émettent des radiations de longueur d'onde caractéristique de l'élément. Les mesures ont été effectuées sur un spectromètre Jobin-Yvon ULTIMA.

Pour les 150 échantillons concernés, cette analyse a systématiquement été complétée par la mesure de la perte au feu (perte de masse résultant de l'échauffement d'un échantillon à 1000°C pendant trois heures).

C-6) Conclusion

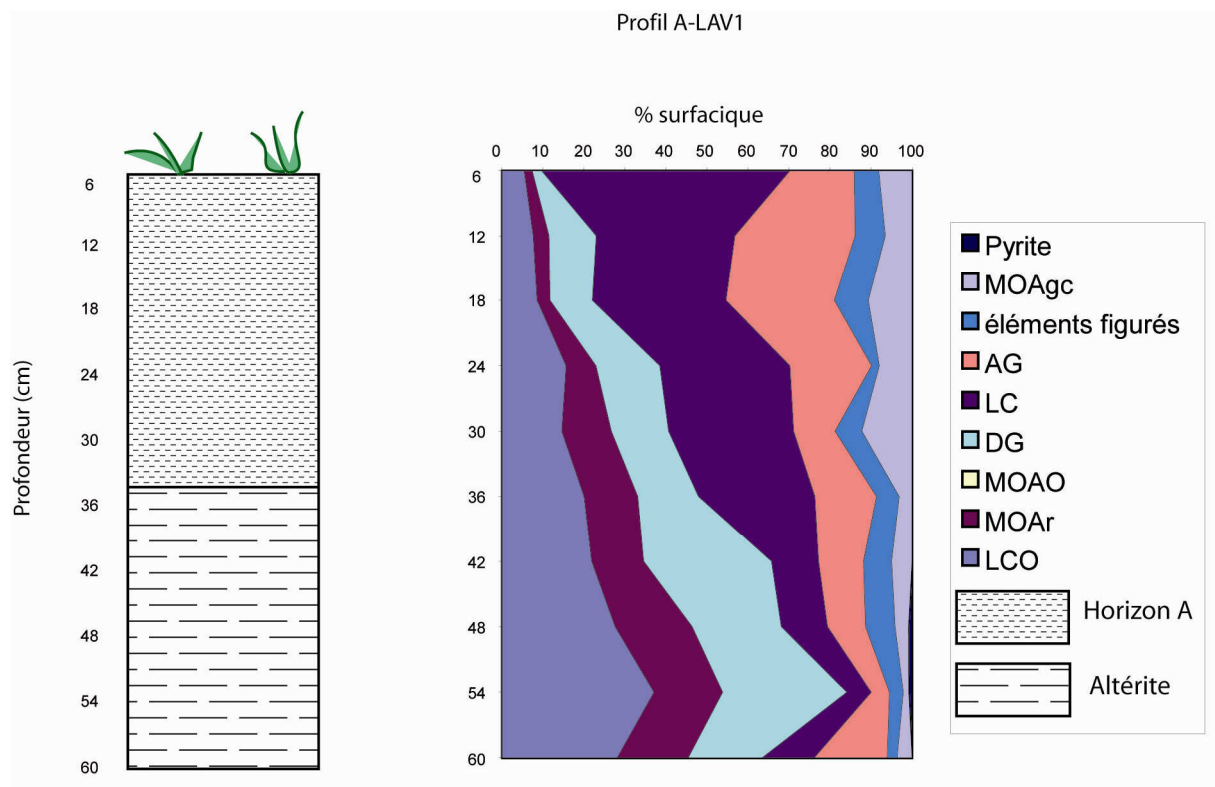
Chaque méthode précédemment présentée possède bien évidemment ses propres avantages et inconvénients (tableau II-6). Certaines, comme le palynofacies, ou l'analyse moléculaire permettent de rendre compte de la pluralité de la MO au sein d'un échantillon, mais ne permettent de travailler que sur une fraction de cette dernière. Les méthodes géochimiques et isotopiques permettent la caractérisation de différents groupes de MO selon leurs âges ou origines, mais sont effectuées sur le « bulk », rendant difficile toute interprétation dans le cas de mélanges de MO différentes. Ces analyses se révèlent par contre complémentaires pour l'étude et le suivi de MOF (et COF) lors du transfert d'un compartiment à un autre.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
<u>Méthodes optiques</u>		
Palynofacies	<ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte de la pluralité de la MO - Distinction des particules de MOR et MOF 	<ul style="list-style-type: none"> - Obtention de % surfacique : absence de quantification - Prise en compte uniquement de la fraction non acido-soluble de la MO
Mesure du pouvoir réflecteur	<ul style="list-style-type: none"> - Estimation du degré de maturation thermique des particules réfléchissantes au sein de chaque échantillon 	<ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte des particules réfléchissantes uniquement
<u>Méthodes géochimiques</u>		
Pyrolyse Rock-Eval	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse quantitative et qualitative rapide du Corg du échantillon 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse sur le « Bulk » : valeur moyennée dans le cas d'un mélange de Corg d'origines diverses
C/N	<ul style="list-style-type: none"> - Discrimination de différents échantillons selon l'origine et la nature de la MO 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse sur le « Bulk » : valeur moyennée dans le cas d'un mélange de Corg d'origines diverses - Evolution du C/N de la MOR suite à sa dégradation, confusion possible avec la MOF
<u>Méthodes isotopiques</u>		
$\delta^{13}\text{CPDB}\%$	<ul style="list-style-type: none"> - Discrimination de différents échantillons selon l'origine et la nature de la MO. 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse sur le « Bulk » : valeur moyennée dans le cas d'un mélange de Corg d'origines diverses
Age radiocarbone	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en évidence de carbone ancien au sein d'un échantillon 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse sur le « Bulk » : valeur moyennée dans le cas d'un mélange de Corg d'origines diverses
<u>Méthodes moléculaires</u>		
GC-MS	<ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte de la pluralité de la MO - Données qualitatives sur la nature de la MO 	<ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte uniquement des composés extractibles

Tableau II-6 : Récapitulatif des avantages et inconvénients des méthodes utilisées.

Chapitre III

Mise en évidence de la contribution en COF dans les compartiments étudiés



Où l'on raisonne en pourcentages...

Le présent chapitre présente les résultats qui nous ont permis de mettre en évidence la contribution en COF au sein des différents compartiments étudiés : roches, altérites, sols et particules fluviales. Il comporte quatre parties d'inégales longueurs.

- La première partie illustre une étude préliminaire que nous avons menée sur les concentrés organiques observés (palynofacies) afin de distinguer les fractions organiques et minérales.

- La seconde partie présente une synthèse des résultats des multiples investigations conduites sur les échantillons récoltés lors de la campagne de terrain de 2001. Cette partie est présentée sous la forme d'un article.

- La troisième partie expose les résultats complémentaires, concernant les échantillons prélevés durant la campagne de terrain de 2006.

- La quatrième partie synthétise l'ensemble des informations délivrées par ces différents travaux.

A) Etude préliminaire concernant la matrice observée au sein des concentrés organiques (palynofacies)

Il se révèle nécessaire, avant d'exposer les résultats des études optiques du type palynofacies (parties B et C), de présenter une étude portant sur le contenu des concentrés « dits » organiques observés des échantillons de roches callovo-oxfordiennes, aaléniennes et toarciennes. En effet, l'observation de ces derniers révèle la présence d'une matrice tapissant le fond des lames, pouvant représenter jusqu'à 90 %, environ, des surfaces comptées (figure III-1). La connaissance de sa nature, minérale, ou organique, est donc indispensable à l'interprétation ultérieure des résultats.

Son identification a été abordée selon trois approches différentes : -1) la caractérisation de la phase minérale par microscopie MET ; -2) l'analyse par rayon X des concentrés organiques ; -3) la pyrolyse Rock-Eval.

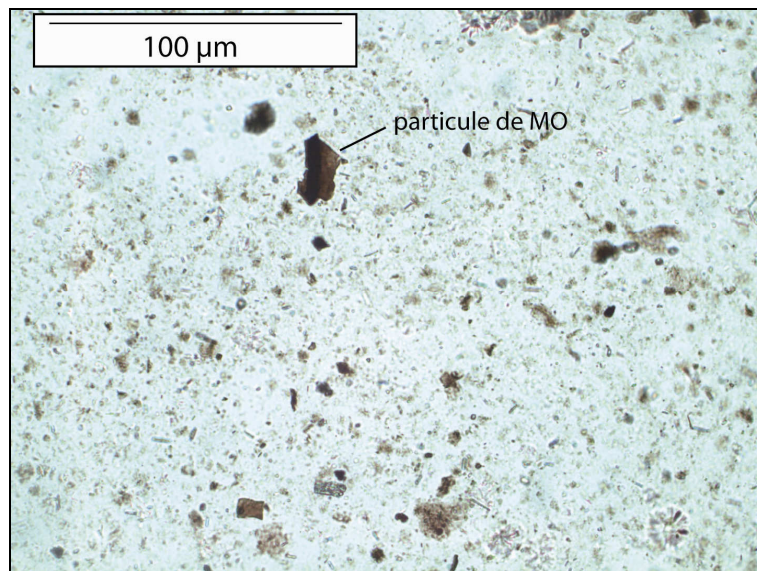


Figure III-1 : Particule de MO au sein d'une matrice de nature inconnue.

A-1) Microscopie Electronique en Transmission (MET)

Deux concentrés palynologiques, correspondants aux échantillons du profil 06-LA S2 PL prélevés à 45 et 135 cm²⁵ de profondeur ont été soumis à cette analyse. Après broyage de ces concentrés à une granulométrie inférieure à 0,5 µm, les analyses et observations ont été effectuées à l'aide d'un microscope Philips CM20 équipé d'un détecteur EDS d'électrons secondaires permettant l'analyse élémentaire sur les éléments plus lourds que le fluor.

- Echantillon 06-LA S2 prélevé à 45 cm : nous avons observé dans le concentré organique une phase minérale constituée par une agglomération de petits cristaux et de particules mal cristallisées. Ces éléments minéraux (figure III-2a) se caractérisent par des associations aluminium / calcium, aluminium / calcium / silice, aluminium / silice / fer ou encore par l'association chrome / fer. Ils peuvent être interprétés comme des argiles, des restes de carbonates, ou des oxydes de fer. Nous notons aussi l'abondance de cristaux de titane en baguettes ou sphériques, pouvant correspondre à de la pérovskite (CaTiO₃, figure III-2b)

L'imagerie MET a aussi permis l'observation d'une phase organique constituée de particules de carbone (figure III-2c), présentant parfois une morphologie particulière de type « mousse »²³ (figure III-2d).

- Echantillon 06-LA S2 prélevé à 135 cm : nous avons ici encore observé dans le concentré organique un fond minéral constitué par une agglomération de petits cristaux et complexes mal cristallisés. Ces éléments minéraux se caractérisent par des associations aluminium / magnésium / calcium ou encore chrome / fer (figures III-3a, b et c). Nous observons par ailleurs des cristaux très bien formés constitués de zirconium (potentiellement du zircon, ZrO₂, figure III-3d) ainsi que des particules riches en titane (figure III-3-e).

L'imagerie MET a aussi permis l'observation de particules de carbone caractérisées par une morphologie en « coque »²⁶ (figure III-2 b, c et d). Les images de haute résolution

²⁵ 06 LA S2 PL 135 cm correspond à un échantillon de roche callovo-oxfordienne.

²⁶ Ces particules sont couramment observées dans les carbonates naturels, mais leur origine reste discutée. Certains auteurs ont supposé qu'elles pouvaient résulter de la carbonisation d'hydrocarbures restés à proximité des kérogènes d'où elles étaient issues (Beyssac et al, 2002). Leurs morphologies peuvent être issues de moulages sur les faces des minéraux.

montrent qu'elles sont formées par du carbone pré-graphitique avec une distance $d_{002} = 0,355\text{nm}^{27}$.

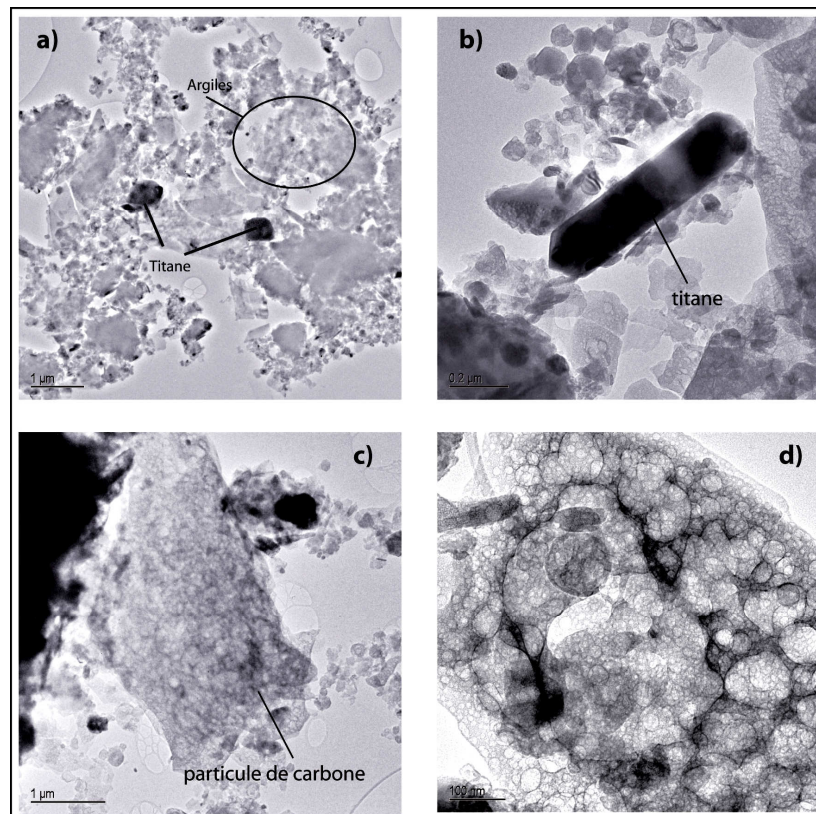


Figure III-2:

Phases minérales et organiques observées par microscopie MET (échantillon 06-LA S2 PL 45 cm):

- a) apparence de la phase minérale constituée d'argile et de cristaux très contrastés de ;*
- b) baguette de titane, pouvant être de la pérovskite ; c) particule de carbone ;*
- d) particule de carbone, morphologie en « mousse ».*

²⁷ Un cristal contient une infinité de plans dans lesquels les atomes (ou les nœuds du réseau) sont arrangés périodiquement : ce sont les plans réticulaires. La distance inter-réticulaire d_{002} est la plus courte distance entre deux plans.

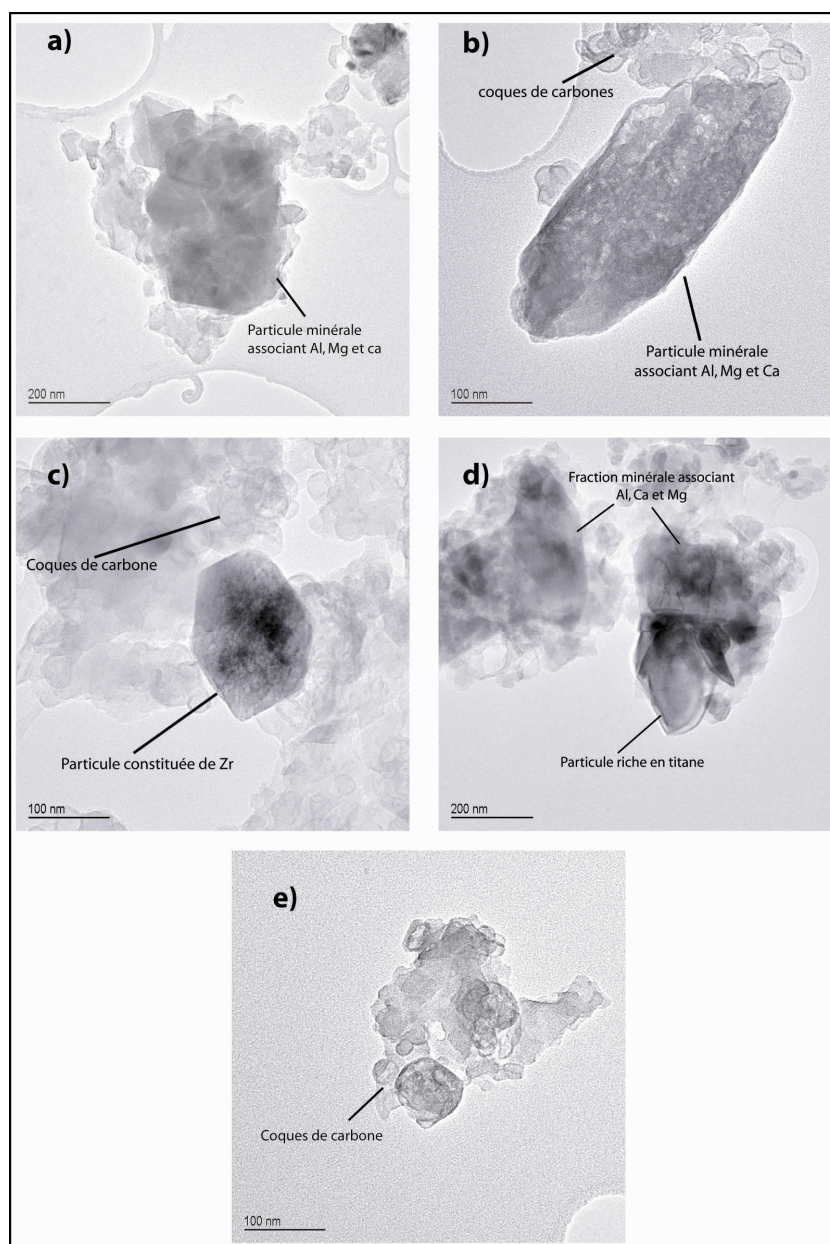


Figure III-3:

Phases minérales et organiques observées par microscopie MET (échantillon 06-LA S2 PL 135 cm) : a) particule minérale associant Al, Mg et Ca; b) particule minérale associant Al, Mg et Ca et coques de carbone ; c) particule constituée de Zr et coques de carbone; d) particule riche en titane (en bas à droite) et fraction minérale associant Al, Ca et Mg ; e) particules de carbone en coques.

A-2) Rayons X

Deux échantillons de concentrés organiques, correspondant aux roches Br4R2 (Aalénien inférieur), et T5 (Callovo-Oxfordien) ont été soumis à cette analyse.

- **Echantillon Br4R2 (figure II-4a)** : l'analyse par rayon X de ce concentré organique révèle l'absence de calcite au sein de l'échantillon. Nous n'observons pas non plus de pic significatif de phase argileuse. Si cette dernière existe, elle n'est pas organisée. Nous observons par contre un épaulement caractéristique d'une phase amorphe, probablement constituée de matière organique.

- **Echantillon T5 (figure II-4b)** : le spectre permet de mettre en évidence la présence d'argiles organisées.

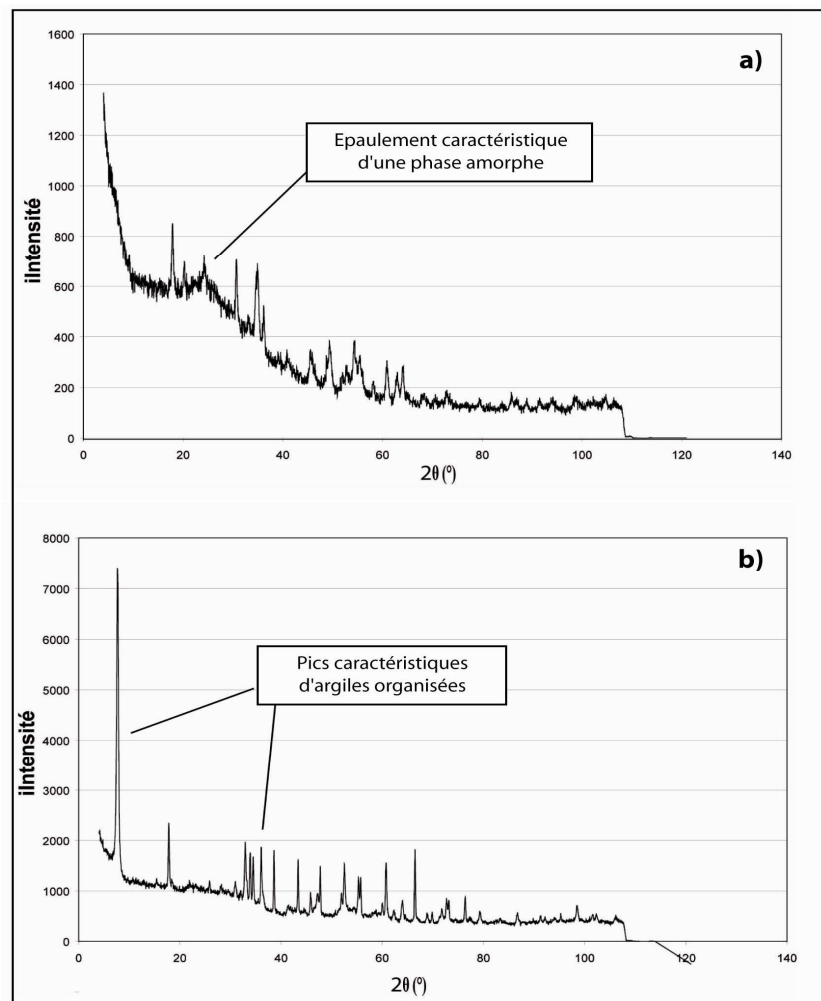


Figure III-4 : Diffractogrammes des échantillons BR4R2 (a) et T5 (b).

A-3) La pyrolyse Rock-Eval

Les concentrés organiques des échantillons de roches L8to9 (Toarcien), T5, et 06-La S2 PL 135 cm (Callovo-Oxfordien) et Br4R2 (Aalénien inférieur) ont été soumis à la pyrolyse Rock-Eval. Les COT de ces concentrés (figure III-5) varient de 1,74 à 9,67%, ce qui est très largement inférieur aux valeurs attendues pour de la MO pure. Ceci prouve la présence d'une phase minérale, pouvant dépasser 90% de la masse de ces concentrés²⁸.

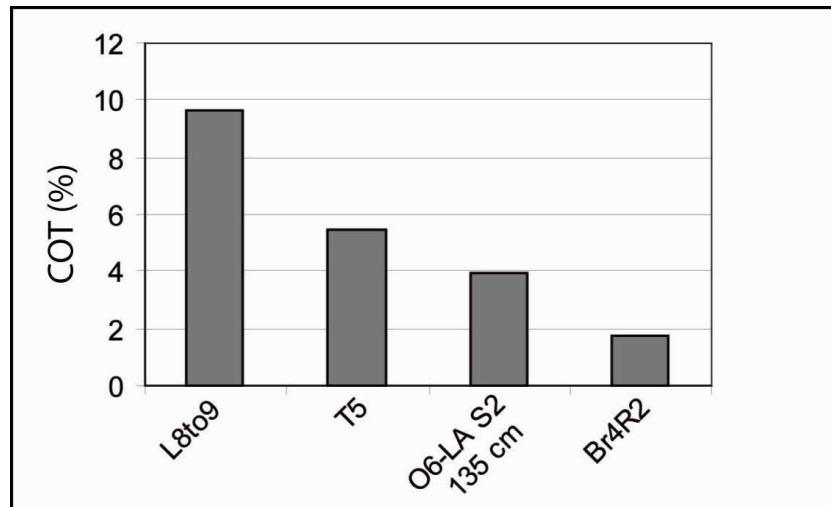


Figure III-5 : TOC des concentrés organique des échantillons L8to9 (roche toarcienne), T5, 06-LA S2 135cm (roches callovo oxfordiennes) et Br4R2 (roche aalénienne inférieure).

²⁸ Ne connaissant pas le rapport Corg/MO, il est difficile de connaître exactement le % massique de la phase minérale au sein des échantillons à l'aide du seul COT. Cependant les faibles valeurs ici mesurées sont suffisantes pour affirmer que cette phase minérale est prépondérante et peut dépasser les 90%.

A-4) Conclusion

Les résultats obtenus prouvent la présence de matière minérale au sein des concentrés organiques destinés aux analyses optiques. Celle-ci, entre autre formée d'argiles, est constitutive de la matrice observée lors des investigations par palynofacies. En conclusion, bien qu'elle puisse représenter 90 % de la masse des concentrés organiques, et 90 % des surfaces comptées, cette matrice ne sera pas prise en compte lors de l'interprétation des données optiques.

B) Mise en évidence de la contribution en carbone organique fossile dans les compartiments étudiés : résultats mission 2001

Cette partie, présentée sous forme d'article (soumis dans Organic Geochemistry) est une compilation que nous avons établie à partir des différents travaux antérieurs à cette thèse. Elle porte plus précisément sur l'étude des échantillons collectés lors de la campagne de terrain de 2001 : c'est-à-dire ceux issus des profils d'altération A-LAV1, A-LV2, A-LAV3, A-BRV1 et A-BLAV1, des profils de sols LA3, LA5, BR4, BR6 et BR10, les échantillons de roches T4, Br-2R, Br-6R2, Br-4R2 et L8to9, ainsi que 8 échantillons de particules fluviales prélevés en 2000 et 2001 aux exutoires des bassins du Brusquet et du Laval. Elle repose sur un large panel analytique comportant des investigations optiques (palynofacies), géochimiques (Pyrolyse Rock-Eval, C, N), isotopiques (^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$ PDB‰) et moléculaires (Couplages chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse).

Les résultats montrent une contribution significative en COF dans l'ensemble de ces compartiments étudiés. Plus précisément, ils suggèrent que les transferts Roches / Altérites (dominé par l'altération chimique des roches) et Roches / Particules fluviales (dominé par l'altération mécanique des roches) ne semblent pas avoir d'impacts qualitatif et quantitatif sur le contenu organique fossile. Le transfert Altérites / Sols (dominé par les altération (bio)chimiques) semble par contre le lieu d'une transformation et de perte en COF.

Cette étude confirme la résistance, au moins partielle, du COF aux différents processus d'altération et de la nécessaire prise en compte de ce problème dans l'étude du cycle du carbone.

Fossil organic matter occurrence in modern environments: optical, geochemical and isotopical evidences.

Yann Graz¹, Christian Di-Giovanni¹, Yoann Copard², Marcel Elie³, Pierre Faure³, Fatima Laggoun Defarge¹, Jean Lévêque⁴, Raymond Michels³, Jean-Emmanuel Olivier⁵

¹ ISTO, UMR 6113 CNRS/Université d'Orléans, Bat ISTE, rue de la Férollerie 45071 Orléans Cedex 2, France

² M2C, UMR 6143 CNRS/Université de Rouen, place E. Blondel, Bat. Irese A, Université de Rouen, 76821 Mont Saint Aignan Cedex, France

³ G2R UMR 7566 CNRS/Université Henri Poincaré - BP 239 54506 - Vandoeuvre-les-Nancy Cedex, France

⁴ UMR A111 INRA/Université de Bourgogne- GéoSol, 6 bd Gabriel 21000 Dijon, France

⁵ CEMAGREF, Grenoble, Unité de recherche ETNA, BP 76, 38402 Saint Martin d'Hères, France

*Correspondance to: Y. Graz, ISTO, UMR 6113 du CNRS, Univ. Orléans, bat. ISTE, 1A rue de la Férollerie 45071 Orléans cedex 2, France. E-mail: Christian.Di-Giovanni@univ-orleans.fr. Fax: (33) 02-38-41-73-12

ABSTRACT - This present work relates to the fossil organic carbon (FOC) input and fate into modern environment, and focuses on two experimental watersheds overlying Callovo-Oxfordian marls: Le Laval and Le Brusquet, (1km² in areas) located near Digne (Alpes-de-Haute-Provence, France). Considering that delivery is mainly due to different supergene process affecting sedimentary rocks ((bio)chemical and mechanical weathering), studied samples were collected into different pools: bedrocks, weathering profiles, soils and riverine particles. Complementary investigations were applied to the studied samples: optical (palynofacies method), geochemical (Rock-Eval 6 pyrolysis, C/N ratio), molecular (gas chromatography / mass spectrometry) and isotopic ($\delta^{13}\text{C}$ PDB‰, ^{14}C). As results, FOC markers were identified and tracked through the different pools. Our results highlight the contribution of FOM, which can be found in all the studied pools. Transfer of FOM between bedrocks / weathering profiles (mainly governed by chemical weathering) and bedrocks / riverines particles (rather governed by mechanical one) reveal any qualitative change. Weathering profiles / soils transition (governed by (bio)chemical weathering) is characterised by a FOC alteration, that remains difficult to describe because fossil material is mixed with recent organic matter (ROM). Despite this latter point, this study evidences a relative FOC resistance to weathering processes and point to its contribution into modern geosystem and then carbon cycle.

Keywords : fossil organic matter, experimental watersheds, marls, carbon cycle, weathering, erosion particles.

1 - Introduction

The current increase in atmospheric CO₂ since industrial revolution, recognized as a green house gas, induces a series of climatic, environmental, and human consequences (IPCC, 2007). CO₂ concentration is regulated by processes controlling the carbon fluxes, which occur between different carbon pools such as atmosphere, hydrosphere, soils, biomass, lithosphere (Houghton, 1998) and anthropogenic inputs. The present debate concerning the unidentified nature of missing carbon sinks (Kaufmann and Stock, 2003) gives us evidence that many unknowns punctuate estimation of these fluxes. As an example, numerous estimations of soils or rivers carbon amounts or fluxes have been calculated (Eswaran *et al.*, 1993 ; Balesdent, 1996 ; Batjes, 1996 ; Adams and Faure, 1996 ; Carter *et al.*, 1997 ; Holland, 1978 ; Berner *et al.*, 1983, 1989 ; Degens *et al.*, 1991 ; Probst, 1992 ; Amiotte Suchet ; 1995; Ludwig *et al.*, 1996 ; Aitkenhead and McDowell, 2000), and all these estimations rely on the prerequisite that the Organic Carbon (OC) occurring in soils or loaded in rivers exclusively originates from the current vegetal cover production. Such estimates do not take into account a Fossil Organic Carbon (FOC) yield released by sedimentary and metamorphic rocks weathering that can supply soils, rivers and atmosphere. However, numerous field studies have shown the occurrence of FOC in modern carbon pools such as soils (Lichtfouse *et al.*, 1997a, b ; Di Giovanni *et al.*, 1998), rivers (Kao *et al.*, 1996) and marine sediments (Dickens *et al.*, 2004), thus revealing a strong resistance to weathering process. As example, the long-term chemical weathering of shales and carbonates annually releases between 0.04 and 0.1 Gt OC / year at the global scale (Di-Giovanni *et al.*, 2002 ; Copard *et al.*, 2007).

However, investigations can be considered either as “multi-pools - mono-analytical” approaches or “mono-pools - multi-analytical” approaches. Indeed, Noel (2001), Di-Giovanni *et al.* (1999a, b), Sebag *et al.* (2005, 2006) proposed optical investigations on organic particles from soils and rivers. Petch *et al.* (2000) focused their studies on weathered marls profiles using geochemical and infrared investigation. Raymond and Bauer (2001) discussed isotopic and chemical investigations on fluvial samples.

This study proposes a first field study marked by a “multi-pools - multi-analytical” approach. Indeed, optical, isotopic chemical and molecular investigations were conducted in order to precise FOC contribution in various continental supergene carbon pools by considering both weathering profiles, soils, suspended and riverine loads. These

investigations were carried on watersheds lying on marly bedrocks because OC content of such sedimentary rocks is higher than carbonate and sandstones, and these rocks represent about 30 % of the global continental surface (Amiotte-Suchet *et al.*, 2003).

2 - Experimental research site and sampling

Studied area corresponds to two experimental watersheds (Le Laval, 44° 08' 33'' N, 06° 22' 05'' E and Le Brusquet, 44° 09' 46'' N, 06° 19' 38'' E) located near Digne (Alpes-de-Haute-Provence, France) (Mathys, 2006, figure III-6). Le Laval watershed is characterised by a poor vegetation density (21 %) made up of grass, graminaceous, broom, scots pines and oaks overlying Callovo-Oxfordian marly limestones. Le Brusquet watershed is mainly composed of Scots pines forest (87 %) overlying Toarcian black shales, upper Aalenian grey shales, lower Aalenian limestones and Bajocian marly limestones. Representative samples were collected into soils, river, weathering profiles and bedrock.

Geological facies: Five samples (T4, Br-2R, Br-6R2, Br-4R2 and L8TO9), including overall of geological facies outcropping in these watersheds were examined (Callovo-Oxfordian, Bajocian, upper-Aalenian, lower-Aalenian and Toarcian).

Soils profiles: The soils organic content depends on vegetation productivity and bedrock organic content (Duchauffour, 2001). Based on these parameters, five soil profiles were sampled: OL, OF, OH and organo-mineral (A). LA 3 and LA 5 overlay Callovo-Oxfordian marls, and are covered with dense or open pines and oaks forest, respectively. BR4, BR6 and BR10 are covered with dense pines forest but overlay respectively lower Aalenian limestones, upper Aalenian grey shales and Toarcian.

Watershed weathering profiles: The three studied weathering profiles from 'Le Laval' watershed (on marly Callovo-Oxfordian bedrock), are either in a flat context, exhibiting (pasturage: A-LAV1) or not (barren: A-LAV2) vegetation covers, or in a slope context without vegetation (A-LAV3). We added two other profiles from 'Le Brusquet' watershed: (i) one on marly Toarcian bedrock (A-BRV1) and (ii) one on upper Aalenian bedrock (A-BLAV1). These two profiles exhibit vegetation covers in a flat context. For each profile and

at each level, sampling was conducted considering compact fragments of rock (pl) and fine and friable elements (tf).

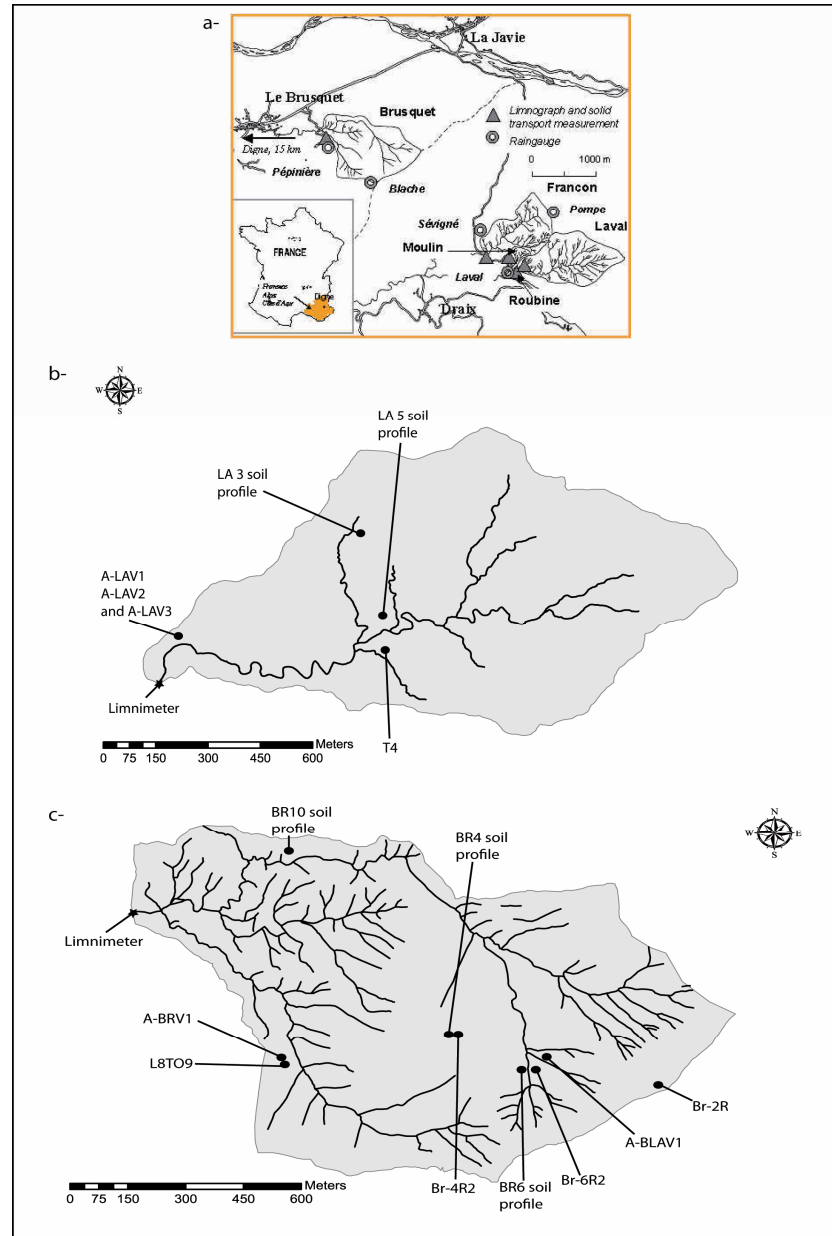


Figure III-6: Experimental research site

a) geographical location of experimental watersheds of Draix (Mathys, 2006);

b) Laval watershed samples localisation;

c) Brusquet watershed samples localisation.

Riverine particles samples were taken at the outlet of the watersheds.

Riverine particles: Eight riverine particles samples from two watersheds were also examined. We have distinguished four ‘Le Laval’ Suspended Load samples picked up with automatic sampling at spring, summer and autumn (SL: LA SL 19/03/01, LA SL 28/04/00, LA SL 15/06/00, LA SL 12/10/00), and one ‘Le Brusquet’ SL sample (BR SL 15/06/00) picked up at spring. Two ‘Le Laval’ Bed Load samples were also picked up at spring and summer (BL: LA BL 28/04/01, LA BL 16/06/00), and one ‘Le Brusquet’ BL sample picked up at summer (BR BL 28/04/01).

3 – Methods

3 – 1 - Optical investigations

Optical investigations (palynofacies method) were performed with a DMR XP Leica microscope by using transmitted light mode. Initially introduced by Combaz (1964), this method concerns the study of thin slides of a total assemblage of particulate organic matter previously chemically-isolated (HCl – HF residues of sedimentary rocks). Palynofacies method involves the distinction of different categories of petrographic components, according their size, form, colour and the estimate of their relative proportion to the particular organic assemblage (Combaz, 1980 ; Tyson, 1995). Relative quantification was performed with a 50 x objective and is effective when 500 items are counted. Supplementary observations were also made on polish sections through reflected light and under UV excitation.

10 categories of organic particles were identified in studied samples (Figure III-7): 1) - Gelified Debris (GD) ; 2) - Cuticle fragments (Cut) ; 3) - Spore and Pollens (SP) ; 4) - Mycelium fragments (Myc) ; 5) - Translucent Ligno-Cellulosic fragments (TLC) with recognisable woody structure and a strong fluorescence under UV excitation ; 6) - Degraded Ligno-Cellulosic fragments (DLC), showing an orange to brown colour characterising a more and less slightly degraded cell structure ; 7) - Opaque Ligno-Cellulosic fragments (OLC) fragments that do not display any identifiable structure as well as any fluorescence under UV excitation, these particles are separated by their shapes (elongated –el OLC and squat – sq OLC) ; 8) - Corroded outlines opaque Ligno-Cellulosic fragments (CoOLC) resulting from combustion of biomass during wildfire or human activities (pyrofusinite particles) or resulting

in air oxidation without heating prior burial (fusinite particles) ; 9) - Opaque Debris (OD) that can not describe following these features ; 10) - Reddish amorphous organic matter (RAOM), We also mention relative proportion of pyrite, insoluble to acid treatments

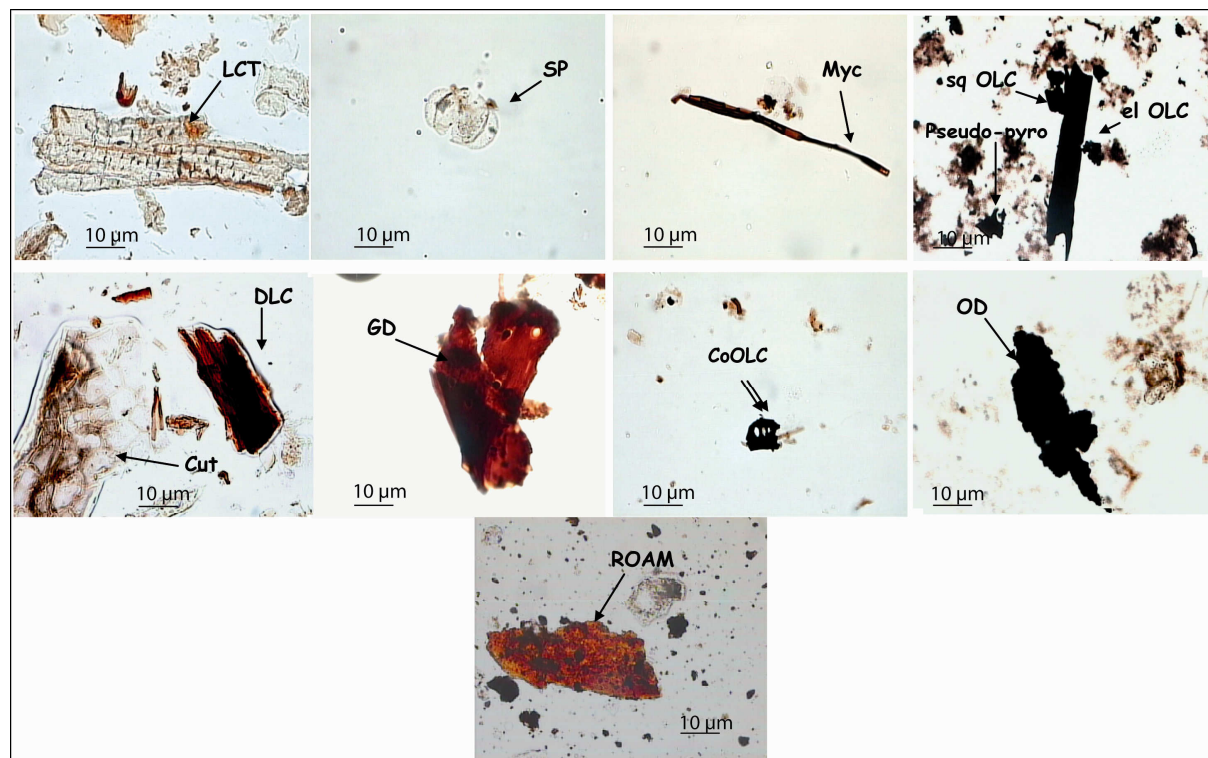


Figure III-7: Categories of particulate organic matter distinguished by their morphological criteria:

Gelified Debris (GD); Cuticular fragments (Cut); Spore and Pollens (SP); Mycelium fragments (Myc); Translucent Ligno-Cellulosic fragments (TLC); Degraded Ligno-Cellulosic fragments (DLC); Opaque Ligno-Cellulosic fragments (OLC) fragments that do not display any identifiable structure as well as any fluorescence under UV excitation, these particles are separated by their shapes (elongated –el OLC and squat –sq OLC); Corroded outlines opaque Ligno-Cellulosic fragments (CoOLC); Opaque Debris (OD); Reddish amorphous organic matter (RAOM).

3 – 2 - Chemical investigations

Samples geochemical signature was acquired with RE6 pyrolysis (Vinci Technologies®). Previously developed for sedimentary rocks analyses, this methods has been now successfully tested for recent material (Di-Giovanni *et al.*, 1998 ; Noël, 2001 ; Disnar *et al.*, 2003 ; Sebag *et al.*, 2006).

Experimental protocol comprises two successive analytical stages performed with a temperature program of $25^{\circ}\text{C min}^{-1}$. The first one consists of a pyrolysis in an oven of 100mg of previously crushed sample. Hydrocarbons and oxygenated compounds yielded during a temperature jump from 200 to 650°C are quantified by nitrogen and quantified by using fame ionization and infrared detectors. The second stage consists of the oxidation, in an oven and upon air, of the carbonaceous residue subjected at temperature ranging from 400°C to 750°C (Espitalié *et al.*, 1985 ; Lafargue *et al.*, 1998 ; Behar *et al.*, 2001).

Analysis of this signal provides some parameters such as i) Tmax, expressed in $^{\circ}\text{C}$, that is the temperature at which the release maximal amount of hydrocarbon occurs and ii) Hydrogen Index (HI, in $\text{mg HC g}^{-1}\text{TOC}$), that is can defined as an indicator of the richness of hydrogen of pyrolysed sample. Amount of Organic Carbon (OC) of samples is given by Total Organic Carbon (TOC, expressed in %), that is equal to the sum of pyrolysed organic carbon plus residual organic carbon provided by oxidation stage.

3 – 3 - Molecular investigations

Soils and sediments samples (suspended matter, bed load, bedrocks, soils on the surface and depth) were freeze-dried and crushed before being extracted with dichloromethane. The organic extract thus obtained was fractionated by liquid chromatography (alumina and silica column) in saturated, aromatic and polar components. The obtained extract was diluted with dichloromethane and then quantitatively transferred to the top of the micro-column of activated alumina. Elution of hydrocarbon fractions (saturated + aromatic compounds) was carried out using dichloromethane. The vial containing the hydrocarbon fraction was evaporated to dryness under N_2 , and was then diluted with n-pentane and quantitatively transferred to the top of the micro-column of activated silica. Elution of saturated fraction was carried out using n-pentane. Aromatic compounds were eluted with n-pentane/dichloromethane.

Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analyses of aliphatic and aromatic hydrocarbons were performed with a HP5890 series II GC coupled to an HP5972A mass spectrometer in order to obtain molecular geochemical fingerprints. Only some weathering profiles (A-LAV1, A-lAV2, A-BRV1 and A-BLAV1), associated bedrocks and Riverine Particles samples were analysed in order to trace FOC after its release.

3 – 4 - Isotopical and chemical investigations

Samples were crushed, decarbonated (H_3PO_4 , 1N), rinsed and air-dried. Because of remaining carbonates after a first H_3PO_4 attack, bedrocks and soils deeper layers (A1 layers) samples were decarbonated a second time with HCl (2N). X-rays diffractograms were used to check the efficiency of samples decarbonation. Br-2R sample, corresponding to Bajocian substratum, was submitted to an attack with hot and concentrated hydrochloric acid during 1 hour in order to eliminate dolomite evidenced using x-rays diffractograms.

Isotopic ($\delta^{13}\text{CPDB}\%$) and elementary (carbon and nitrogen %) measurements were carried out on mass spectrometer with continuous flow VG-Isochrom EA using Graphite IAEA USGS-24 carbon /azote, Sulphanilamide Carlo Erba as $\delta^{13}\text{CPDB}\%$ standart.

4 – Results

4 – 1 - Optical data

Bedrock samples: Palynofacies counting of bedrock samples (figure III-8) reveals a strong predominance of opaque particles (OLC, OD) that can reach 65-96 % of observed organic matter. The RAOM and GD particles, miss or slightly present in the bedrocks of ‘Le Brusquet’ watershed (<5 %), are more abundant in the BV of ‘Le Laval’ (RAOM= 25 %; GD = 10 %). Pyrite is observed in overall rock samples and its relative proportion varies between 3 and 30% of items.

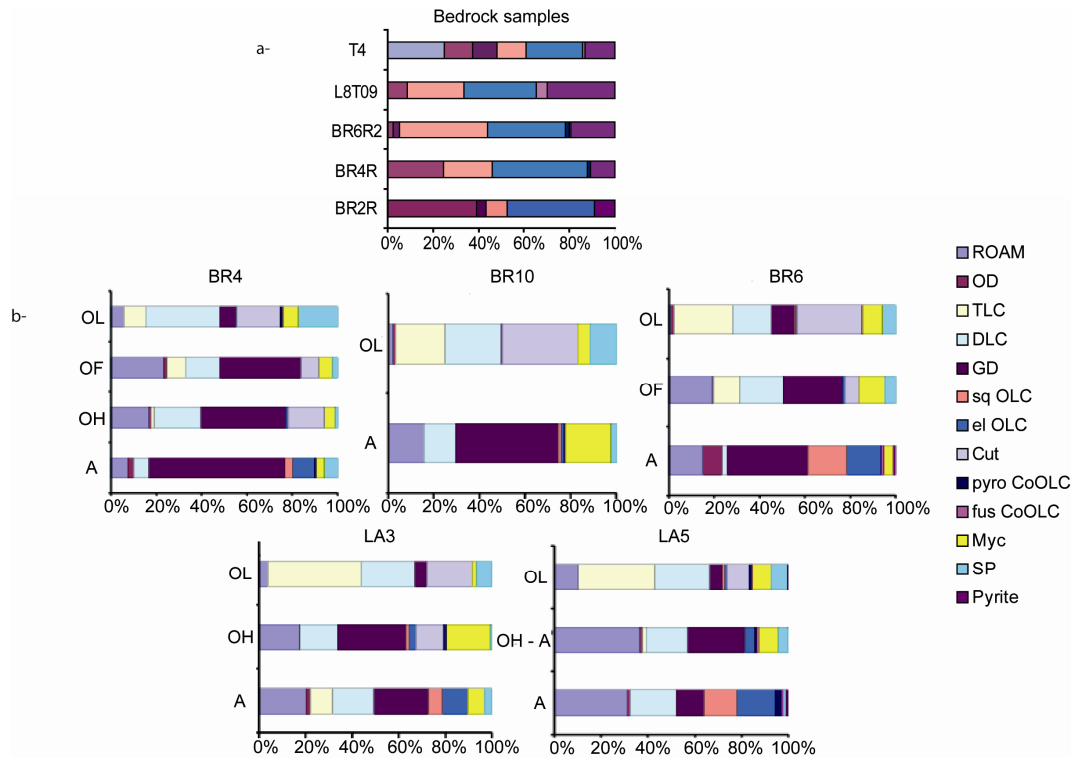


Figure III-8: Palynofacies counting
 (a) Palynofacies counting of the five bedrocks samples.
 (b) Palynofacies counting of soils profiles samples.

Soils profiles: In soils (Figure III-8), observed particles are mainly composed of TLC, DLC, SP, cuticles and mycelium fragments (between 60 to 80 %) but their relative contribution decreases from OL layers to A1 ones (between 2 to 25 %). Conversely, RAOM and GD increase with depth since 9 % in OL layers to more than 50 % in A1 ones. Opaque particles

are very scarce in OL layers (less than 3,5 %), but they increase with the depth and represent between 5 and 45 % of observed organic particles in A1 layers. These opaque fragments are mainly constituted of OLC and OD with no significant trend of corroded opaque particles (CoOLC). No significant report of pyrite is noted in soil profiles (i.e. 1 % in A1 layers).

Weathering profiles: Several trends can be evidenced depending on the density of vegetal covers (Figure III-9). The opaque particles represent, with rare exceptions, a very large fraction in all the studied profiles. Their proportion remains constant in profiles without vegetal covers (A-LAV2 and A-LAV3, 45 % to 75 %), and increases with the depth in profiles underlying significant vegetal covers (A-LAV1, about 25 % to 45 %, A-BRVI about 5 % to 45 %, A-BLAV1, about 5 % to 57 %). Conversely, fresh (TLC, Cut) or little transformed (DLC) materials are present in significant quantity when the profiles are covered with vegetation (A-LAV1, A-BRVI, A-BLAV1) and decrease with the depth from approximately 25 % on the surface to <5 % in the deep samples. Except A-LAV2-5 sample (DLC reach 25 %), such particles are very poorly present in profiles without vegetal cover. The organic content of compact fragments of marls (BR4 pl) is also mainly composed of opaque particles (70 %). Fresh material (TLC, DLC and Cut) is in much significant quantity in the tf samples picked up at the same level (BR4 tf). In these profiles, GD does not exhibit a clear evolution as RAOM, pyrite occurs only in the deepest samples of the profiles without vegetal covers (10 to 15 %).

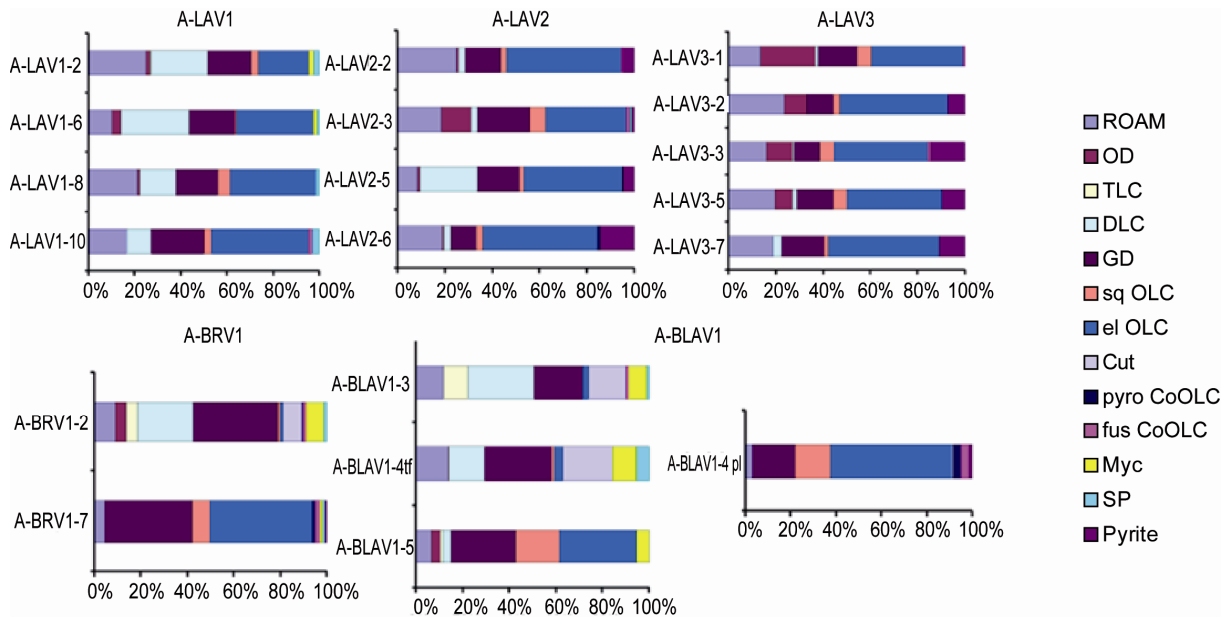


Figure III-9: Palynofacies counting of weathering profiles samples.

Riverine particles: The organic content of River samples (SL and BL) (Figure III-10) is mainly composed of opaque particles (OLC + CoOLC + OD) with an average contribution over than 80 %. Others particles, GD and RAOM, are limited to 9 % and to 5 %, of organic material. GD proportion can reach 15 % of the BL observed organic matter and pyrite is systematically observed in all samples and represents 10 % of counted items.

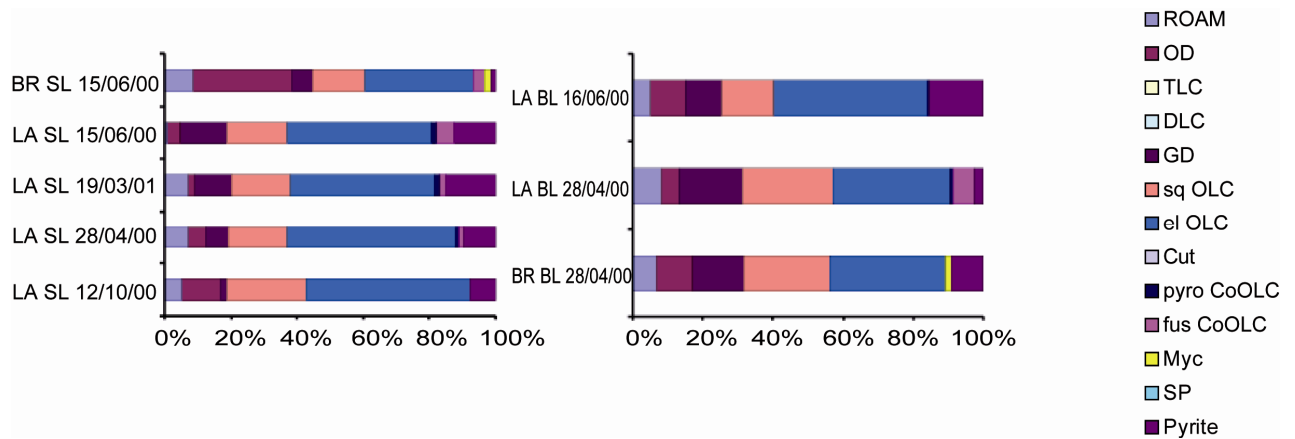


Figure III-10: Palynofacies counting of riverine particles samples.

4 – 2 - Chemical data

Chemical data are listed in Tables 1 and 2 and Figure III-11. Soils profiles, bedrocks, riverines particles and A-LAV1 profile values have already been published by Copard *et al* (2006).

Bedrock samples: Callovo-Oxfordien (R-T4), Toarcian (L8to9) and Upper Aalenian shales (Br-6R2) shales exhibit the highest TOC values ($0.5 < \text{COT} < 0.7$ %). Lower Aalenian carbonates (Br-4R2) and Bajocian marly limestones (Br-2R) show rather lowest values of TOC ranged between 0.10 and 0.15 %. Such low TOC values are also accompanied by low HI (between 26 and 129 mg HC.g⁻¹TOC). Tmax are higher than 340°C (340 to 410°C), excepted for Callovo-Oxfordian marly limestones (R-T4, 211°C).

Weathering profiles: In A-LAV1 profile, TOC decreases from 0 to 35 cm and then remains constant (1.87 to approximately 0.3 %). Tmax and HI values also decrease with depth (400°C

to 215°C and 178 to 59 mg HC.g⁻¹ TOC), excepted for the deepest sample where HI reaches 126 mg HC.g⁻¹TOC. In A-LAV2 and A-LAV3 profiles, TOC (<0.75 %) and HI (<30 mg HC.g⁻¹ TOC) values are very weak and slightly evolve without trend, while Tmax ones are very high (> 500°C). Note that in pl samples Tmax show the highest values (from 582 to 608°C). A-BLAV1 profile exhibits more contrasted values. With the exception of pl samples, with TOC averaging 0.3 %, low HI (A-BLAV1-3 pl HI value is 6 mg HC.g⁻¹ TOC and A-BLAV1-4 and 5 pl samples are totally depleted in hydrogen) and high Tmax (from 481°C to 509°C), both TOC and HI decrease according to the depth in tf samples, (TOC varies from about 10 % to 2.55 % and IH varies from 492 to 171 mg HC.g⁻¹ TOC), while Tmax values tend to increase towards depth (about 330°C to 420°C).

Such similar trends are observed in A-BRV1 profile. pl samples are characterized by weak TOC (<0.12 %), weak Tmax (<265°C) and are totally depleted in hydrogen (HI are 0 HC.g⁻¹ TOC). Others samples TOC and HI values decrease with depth (from 2.39 to 0.15 %, and 133 to 0 HC.g⁻¹TOC). Only Tmax evolution differs from the A-BLAV1 profile and tend to decrease with the depth (from 378 to 250°C), except for sample 7 (592°C).

Soils profiles: Whatever the considered watershed, soils samples exhibit similar TOC trends. Highest values are obtained in litter layers (OL and OF - 30 to 40 %), excepted in BR10 profile (11.91 %). TOC values decrease according to the depth from OH samples (5 to 30 %) to organo-mineral ones A (1.82 – 1.84 %). Such trends are also observed for HI values, OL and OF samples exhibit highest HI values (340 – 533 mg HC.g⁻¹ TOC) while OH and A1 samples exhibit the lowest ones (respectively 320 mg HC g⁻¹ TOC / 157 – 226 mg HC.g⁻¹ TOC). In both watersheds, Tmax values are relatively low in organic layers (320/335°C) and increase significantly in the A1 horizons (>400°C for the Laval watershed and 340/400°C for ‘Le Brusquet’ watershed).

Riverine particles: The suspended load collected in the ‘Le Brusquet’ watershed shows modest TOC (1.26 %) and HI (121 mg HC g⁻¹ TOC) values while bed load sample is characterised by lower TOC (0.72 %) and HI values (28 mg HC g⁻¹ TOC).

Samples collected in ‘Le Laval’ watershed exhibit rather low values. TOC values vary between 0.5 and 0.65 % and the HI values between 50 and 75 mg HC g⁻¹ TOC. Tmax values of the 2 spring SL are close to 200°C (206 and 212°C) whereas those obtained in autumn and summer are higher, respectively 358°C and 501°C. ‘Le Laval’s BL samples are emphasised by TOC identical to that of SL sample but with lower HI values (near 30mg HC g⁻¹ TOC). BL

samples Tmax show similar trends: 204°C for the sample collected in spring and 520°C for the one taken in summer.

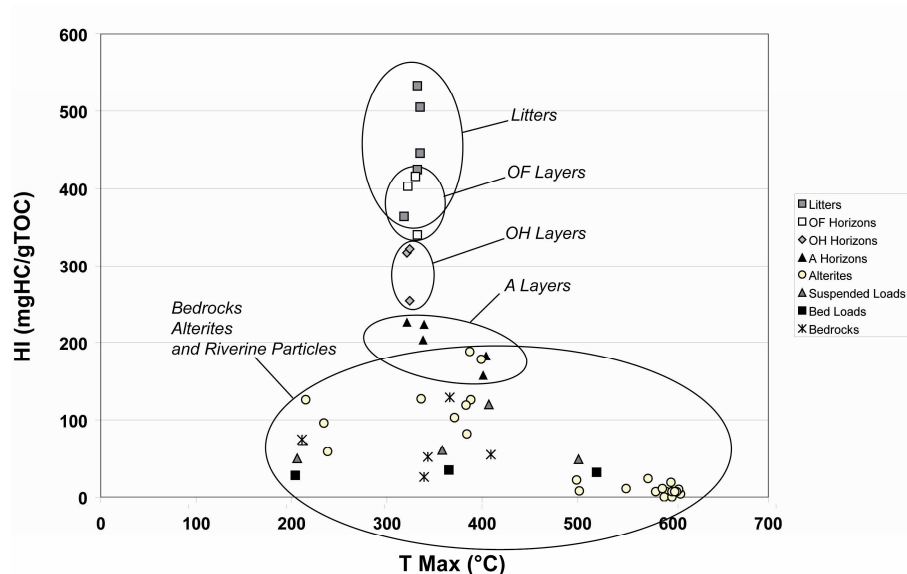


Figure III-11: HI versus Tmax values of the studied samples.

4 – 3 - Molecular characterisations

4 – 3 – 1- Extraction rates

Weak extraction rates (tables 1 and 2) were obtained for all samples.

Bedrocks: Toarcian bedrock sample (L8TO9) has a weak extraction rate (28.8μg/g), while upper Aalenian bedrock sample (Br-6R2) presents a much more significant one (1274.8μg/g).

Weathering profiles: Samples of 3 profiles from “Le Laval” watershed have low extraction rates. The highest rates occur in samples under a vegetal context (A-LAV1) while the weakest ones occur in the non-vegetal context (A-LAV2 and A-LAV3). Samples of 2 profiles from “Le Brusquet” watershed exhibit a clear extraction. A-BRV1 extraction rates decrease with increasing depth, from 65.3 to 30μg/g and A-BLAV1 samples show high extract rates which decrease from 1051.6 to 517.9μg/g with the depth.

4 – 3 – 2- Saturated, aromatic and polar components separation

Bedrocks and weathering profiles: Toarcian bedrock sample (L8TO9) is both dominated by saturated and polar components (respectively 41 and 40.9 %), while upper Aalenian bedrock sample (Br-6R2) is dominated by polar components (98.6 %).

Extractable organic matter in all weathering profiles samples of ‘Le Laval’ and ‘Le Brusquet’ watersheds (tables 1 and 2) mainly consists of aromatic hydrocarbons and polar compounds. However, it can be noted that saturated hydrocarbons and polar compounds dominate the A-LAV1-8 sample. The present study mainly focuses on the saturated and aromatic hydrocarbon fractions because their study appears adapted to discriminate modern to fossil organic contributions. Only ‘Le Brusquet’ profiles (A-BRV1 and A-BLAV1) were analysed because the extract yields of samples from ‘Le Laval’ profiles are too weak.

The near surface samples (A-BRV1 2, A-BLAV1 3 tf) (Figure III-12) are characterized by a bimodal distribution of n-alkanes centred on C₁₇ and C₃₁, and marked by a predominance of odd carbon numbers in the C₂₅-C₃₁ range. Bedrocks samples, L8TO9 and Br-6R2, show a complex distribution of low molecular weight n, iso- or cyclo-alkanes (C₁₆-C₂₃ range), without predominance of odd or even carbon numbers. Intermediate molecular characteristic is observed for the samples A-BRV1 6 pl, A-BRV1 6 tf, A-BLAV1 4 tf and A-BLAV1 4 pl. However, one can note that the relative abundance of heavy n-alkanes decreases when increasing depth.

The intensity of the chromatograms did not allow the study of the aromatic compounds on the whole samples, only the A-BRV1 2, A-BLAV1 4 tf and the A-BLAV1 4 pl samples are exploitable. This makes it possible to highlight dehydroabietane and retene for the Br4-R2 sample, and only dehydroabietane for the two A-BLAV1 samples. Retene and its precursor dehydroabietane are characteristic of gymnosperms (such as spruces, pines...) (Otto and Simoneit, 2001).

Riverine particles: Whatever the sampling season, aliphatic hydrocarbons of SL samples mainly consist of n-alkanes in the C₁₆-C₂₂ range and marked by a predominance of even carbon numbers. Such distribution corresponds to an algal/or microbial contribution. Aromatic hydrocarbons distribution appears to be more complex, with alkyl-benzenes, alkyl-phenantrenes, alkyl-pyrenes, alkyl-chrysenes occurrences. Other aromatic hydrocarbons (norabietatrienes, cadalenes and calamenes) are present all year but become predominant in

summer. Saturated and aromatic hydrocarbon distributions of BL samples are extremely similar to the SL samples ones.

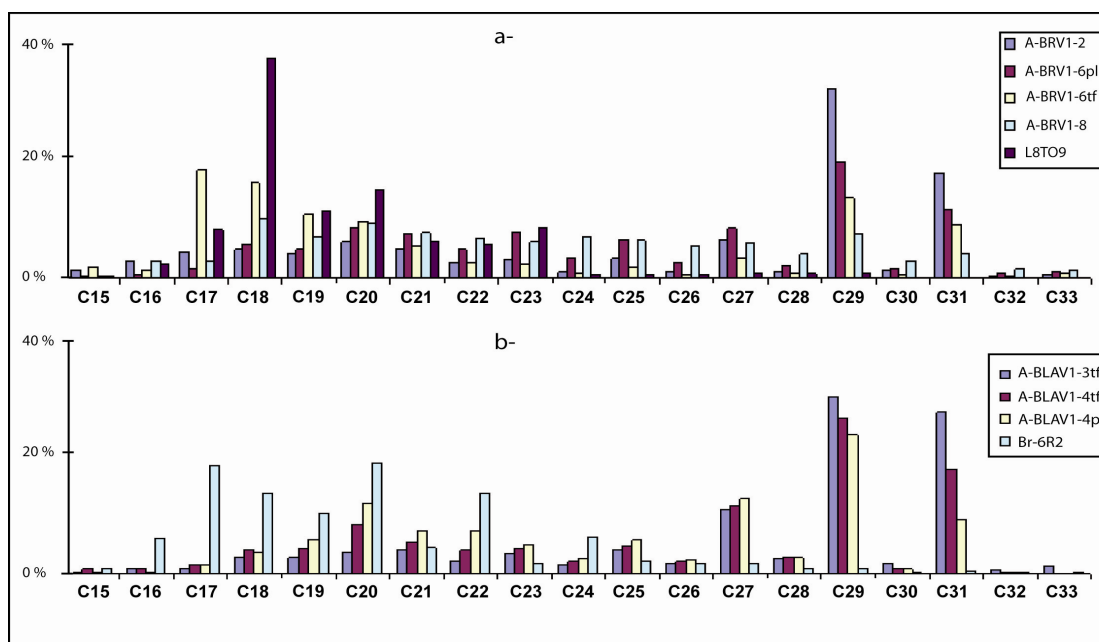


Figure III-12: *n*-alkanes abundance distribution (%) after pic areas integration and normalisation.
 (a) A-BRV1 samples and L8TO9 bedrock sample (Toarcian);
 (b) A-BLAV samples and Br-6R2 bedrock sample (upper-Aalenian).

samples	Rock-Eval parameters				Isotopical Analysis				S2 signal Deconvolution							Rates of extraction (µg/g)	Molecular analysis		
	Tmax (°C)	TOC (%)	IH (HC.g-1CO2)	CaCO3%	C %	N %	C/N	δ13CPDB‰	% F1	% F2	% F3	% F4	% F5	% F6	Saturated hydrocarbons %		Aromatic hydrocarbons %	Polar hydrocarbons %	
	(Copard et al, 2006)								(Copard et al, 2006)										
Bedrocks																			
T4	211.00	0.57	75.00	30.00	0.64	0.08	8.00	-26.70	35.00	0.00	47.50	11.00	0.00	6.50					
Br-2R	366.00	0.14	129.00	70.00	0.26	0.03	8.60	-25.20	2.00	17.50	0.00	69.00	9.00	2.50					
Br-6R2	343.00	0.50	52.00	34.00	0.51	0.09	6.40	-26.10	2.00	19.00	32.00	35.00	8.00	0.00		0.40	98.60		
Br-4R2	409.00	0.11	55.00	90.00	0.13	0.01	13.00	-26.70	4.50	21.00	20.00	23.00	23.50	8.00					
L8O9	339.00	0.70	26.00	36.00	0.75	0.10	7.50	-26.90	29.00	23.50	47.50	0.00	0.00	0.00		18.10	40.90		
Soils																			
LA3-OL	335.00	42.94	505.00	0.00	36.50	0.40	91.25	-26.20	0.00	41.50	35.50	3.00	20.00	0.00					
LA3-OF	322.00	36.45	403.00						0.00	32.00	33.00	18.00	17.00	0.00					
LA3-OH	321.00	31.26	317.00						0.00	16.00	35.00	25.50	14.50	9.00					
LA3-A1	416.00	2.91	226.00	15.00	4.30	0.34	12.65	-25.80	0.00	12.00	19.00	25.00	31.00	13.00					
LA5-OL	332.00	40.05	425.00	0.00	37.90	0.48	79.00	-27.50	0.00	33.50	33.50	13.00	20.00	0.00					
LA5-OH-A1	324.00	5.00	254.00						0.00	6.00	34.00	28.00	16.00	16.00					
LA5-A1	401.00	1.90	157.00	23.00	1.90	0.20	10.00	-25.80	0.00	11.00	25.50	26.50	20.00	17.00					
BR4-OL	335.00	44.34	446.00	0.00	39.40	0.44	90.00	-26.20	0.00	35.00	33.00	5.00	27.00	0.00					
BR4-OF	330.00	36.77	416.00						0.00	31.50	34.00	12.50	17.00	5.00					
BR4-OH	324.00	22.23	322.00						0.00	29.00	35.50	13.00	17.00	5.50					
BR4-A1	338.00	2.51	203.00	35.00	3.00	0.18	17.00	-26.20	0.00	22.00	33.00	13.50	26.00	5.50					
BR6-OL	318.00	39.73	384.00	0.00	20.40	0.27	76.00	-28.40	0.00	39.50	35.00	13.50	12.00	0.00					
BR6-OF	332.00	25.32	340.00						0.00	28.50	30.00	22.00	17.50	2.00					
BR6-A1	404.00	1.82	182.00	22.00	2.40	0.20	12.00	-25.20	0.00	25.00	23.00	31.50	19.00	2.00					
BR10-OL	332.00	11.91	533.00	0.00	33.30	0.84	40.00	-27.70	0.00	33.00	32.00	13.00	23.00	0.00					
BR10-A1	339.00	3.84	223.00	15.00	5.20	0.34	15.00	-26.00	0.00	14.00	34.00	22.00	17.00	13.00					
Riverines Particles																			
LA SL 19/03/01	206.00	0.56	50.00	29.00	0.67	0.10	7.00	-27.00	19.00	10.00	0.00	65.00	20.50	3.00					
LA SL 28/04/00	212.00	0.61	74.00	22.00	0.73	0.10	7.00	-26.40	27.50	0.50	27.00	21.00	10.00	14.00					
LA SL 15/06/00	358.00	0.64	61.00	32.00	0.70	0.09	8.00	-26.70	25.00	0.00	45.50	0.00	11.00	17.50					
LA SL 12/10/00	501.00	0.55	49.00	25.00	0.69	0.11	7.00	-27.00	18.00	6.50	38.50	0.00	7.50	29.50					
BR SL 15/06/00	407.00	1.27	120.00	***	1.60	0.27	6.00	-26.90	1.50	10.00	0.00	65.00	20.50	3.00					
LA BL 28/04/01	204.00	0.50	28.00	37.00	0.51	0.07	7.00	-26.80	50.50	0.50	27.00	21.00	10.00	45.50					
LA BL 16/06/00	520.00	0.47	32.00	38.00	0.54	0.08	7.00	-27.30	27.20	0.00	45.50	0.00	11.00	67.00					
BR BL 28/04/01	365.00	0.72	35.00	40.00	0.77	0.10	8.00	-26.90	15.50	10.00	0.00	65.00	20.50	4.50					

Table III-1: Bedrocks, soils profiles and riverine particles samples values.
Noticed that Rock-Eval parameters and S2 signal deconvolution have already been published by Copard et al (2006).

samples	Rock-Eval parameters				Isotopical Analysis				S2 signal Deconvolution							Rates of extraction (µg/g)	Molecular analysis			
	Tmax (°C)	TOC (%)	IH (HC g – ITOC)	(Copard et al. 2006)	Cac03%	C %	N %	C/N	δ13CPDB‰	% F1	% F2 % F3 % F4 % F5 % F6						Saturated hydrocarbons %	Aromatic hydrocarbons %	Polar hydrocarbons %	
											(Copard et al. 2006)									
Weathering Profiles	(Copard et al. 2006)																			
A-LA1V1-1	399.00	1.87	178.00		45.00	1.07	0.08	13.98	-26.15	0.00	4.50	36.00	17.00	29.00	13.50	71.30	8.10	36.10	55.80	
A-LA1V1-2	388.00	1.02	126.00							0.00	0.00	34.00	76.50	0.00	5.00					
A-LA1V1-3	383.00	0.86	119.00							0.00	0.00	27.00	70.00	0.00	6.00					
A-LA1V1-4	371.00	0.61	103.00							0.00	0.00	20.00	48.00	14.00	18.00					
A-LA1V1-5	336.00	0.49	127.00							24.50	0.00	44.50	0.00	24.00	7.00					
A-LA1V1-6	387.00	0.24	188.00		50.00	0.45	0.07	6.20	-26.64	27.50	0.00	41.00	7.00	12.00	12.50	35.60	6.50	17.40	76.10	
A-LA1V1-7	384.00	0.28	82.00							28.50	0.00	38.00	8.50	15.00	10.00					
A-LA1V1-8	234.00	0.25	96.00		50.00	0.37	0.07	5.29	-26.36	38.50	0.00	34.00	12.00	10.00	5.50	53.40	50.60	23.10	26.30	
A-LA1V1-9	238.00	0.37	59.00		47.00	0.39	0.07	5.48	-26.26	28.00	0.00	34.50	8.00	13.50	16.00	74.20	3.00	10.20	86.80	
A-LA1V1-10	215.00	0.27	126.00		45.00	0.53	0.08	6.63	-28.18	49.00	0.00	37.00	8.00	0.00	6.00	46.50	0.00	29.30	70.70	
A-LA2-1	502.00	0.26	8.00		45.00	0.53	0.08	6.63	-28.18							33.30	14.50	43.50	42.00	
A-LA2-2 pl	582.00	0.71	7.00																	
A-LA2-2 ff	551.00	0.38	11.00																	
ALA2-3 pl	608.00	0.26	4.00		50.00	0.35	0.06	5.71	-27.79											
A-LA2-3 ff	499.00	0.41	22.00																	
A-LA2-4	593.00	0.46	7.00																	
A-LA2-5	591.00	0.07	0.00		50.00	0.42	0.06	7.06	-28.41							25.50	19.60	19.60	60.80	
A-LA2-6	589.00	0.38	11.00		47.00	0.57	0.06	7.04	-28.10							47.30	14.80	36.40	28.80	
A-LA3-1	599.00	0.23	0.00		35.00	0.50	0.08	6.54	-27.55							25.80	6.50	40.70	52.80	
A-LA3-2	606.00	0.39	10.00		36.00	0.46	0.08	4.76	-27.37							32.50	23.10	30.80	46.10	
A-LA3-3	604.00	0.42	7.00		37.00	0.52	0.08	6.60	-27.51							40.60	14.40	22.50	63.10	
A-LA3-4	599.00	0.45	7.00													57.20	29.60	35.20	35.20	
A-LA3-5	574.00	0.49	24.00		37.00	0.55	0.07	7.31	-27.70							35.60	25.60	37.80	36.60	
A-LA3-6	598.00	0.43	19.00																	
A-LA3-7	602.00	0.43	7.00																	
A-BLAV1-1	374.00	6.03	492.00																	
A-BLAV1-2	336.00	17.71	336.00																	
A-BLAV1-3 pl	502.00	0.36	6.00																	
A-BLAV1-3 ff	323.00	3.81	261.00		43.00	3.94	0.25	16.00	-25.34							1051.60	4.40	6.90	88.70	
A-BLAV1-4 pl	509.00	0.29	0.00		54.00	0.45	0.06	7.90	-25.21							447.40	0.40	0.50	99.10	
A-BLAV1-4 ff	415.00	3.25	223.00		52.00	0.99	0.08	12.10	-25.15							814.00	2.40	8.30	89.30	
A-BLAV1-5 pl	481.00	0.22	0.00		54.00	0.43	0.05	7.90	-25.01							517.00	3.70	4.90	91.40	
A-BLAV1-5 ff	418.00	2.55	171.00																	
A-BRUV1-2	378.00	2.39	133.00		56	4.15	0.22	18.4	-26.00							65.30	11.70	24.00	64.30	
A-BRUV1-3 pl	178.00	0.06	0.00																	
A-BRUV1-3 ff	407.00	2.00	129.00																	
A-BRUV1-4	338.00	0.89	82.00																	
A-BRUV1-5	348.00	0.88	83.00																	
A-BRUV1-6 pl	263.00	0.12	0.00		74.00	0.24	0.05	5.00	-27.05							60.90	4.30	50.80	44.90	
A-BRUV1-6 ff	333.00	0.76	96.00		63.00	0.67	0.10	7.10	-26.17							50.10	4.10	74.80	21.10	
A-BRUV1-7	592.00	0.09	0.00													30.00	10.10	51.70	38.20	
A-BRUV1-8	250.00	0.15	0.00		76.00	0.28	0.04	6.30	-26.95											

Table III-2: Weathering profiles samples values.
 Noticed that A-LAV1 Rock-Eval parameters and S2 signal deconvolution have already been published by Copard et al (2006).

4 – 4 – Chemical and isotopical data

Bedrocks (tables 1): Results confirms that bedrocks CaCO_3 contents depend on the lithology. Indeed, limestone samples (Br-2R and Br-4R2) possess high CaCO_3 contents (70 and 90 %) while marly samples (T4, Br-6R2 and L8TO9) show lower ones (between 30 and 36 %). carbon and nitrogen contents do not exceed 1 % and 0.1 % respectively. In detail, limestone samples exhibit the lowest contents (0.26 and 0.13 % for carbon, 0.03 and 0.01 % for nitrogen) and marly samples present higher values (from 0.51 to 0.75 % for carbon, from 0.08 to 0.1 % for nitrogen). C/N ratios are overall weak (from 6.4 to 8.6) excepted Br-4R2 witch C/N value reaches 13. $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ values are close to -26.8 ‰, excepted for Br-2R and Br-6R2 samples where values reach -26.1 and -25.2 ‰.

Weathering profiles (tables 2): CaCO_3 contents are generally high in weathering profiles samples (from 45 to 74 %), excepted for the A-LAV3 samples (from 35 to 37 %). In A-LAV1 profile, carbon contents decrease with depth (1.07 to 0.39 %) whereas nitrogen contents (0.07 to 0.08 %) and $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ values (-26.15 to -26.64 ‰) remain constant. C/N values decrease from 13.98 to 5.29 with depth. In other weathering profiles, pl samples carbon and nitrogen contents do not exceed 0.67 % and 0.07 % and C/N values are overall weak (5 to 7.90). tf and A-BRUV1 2 samples show highest carbon contents (0.37 to 4.15 %), nitrogen contents (0.8 to 0.25 %) and C/N values (7.10 to 18.40). $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ values depend on the studied profiles and are close to -26.3 for A-LAV1; -28.2 for A-LAV2 ; -27.5 for A-LAV3 and -25.10 for A-BLAV1. A-BRUV1 profile have more dispersed $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ values, close to -26.00 for tf and A-BRUV1 2 samples and close to -27.00 for pl and A-BRUV1 8 samples.

Soils profiles (tables 1): CaCO_3 contents are nil in litters and low in A layers (from 15 to 35 %). The lower CaCO_3 contents in A layers (Br6-A1, Br10-A1, La3-A1 and la5-A1) are correlated to lower contents in the underlying bedrocks (Br-6R2, L8to9 and T4). Carbon and nitrogen contents of litters are generally high, around 38 % and 0.44 % respectively, except BR6 litter, which present weakest nitrogen and carbon contents (0.27 % N and 20.40 % C) and BR10 litter sample, which present higher nitrogen content (0.84 %). In A layers, carbon contents are weaker and vary from 1.9 % to 5.2 %, in agreement with the associated bedrock content. Nitrogen contents show the same distribution and vary between 0.18 % and 0.34 %. Litters C/N ratios are high (C/N from 76 to 91.25), excepted for BR10 OL sample (C/N = 40).

Organo-mineral A layers C/N values vary between 12 and 17 and no relationships between these values and bedrock lithology can be displayed. Litters $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ values vary from -26.2 to -28.4 ‰ while A layers ones are lower, from -25.2 to -26.2 ‰.

Riverine particles (tables 1): Percentages of CaCO_3 (25 to 32 %), carbon (0.67 to 0.73 %), nitrogen (0.09 to 0.11 %), C/N ratio (6 to 8) and $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ values (-26.4 to -27 ‰) are homogeneous in all SL samples, with the exception of the higher carbon percentage in ‘Le Brusquet’ summer SL (1.6 %). All these values are very close to those measured in the marly bedrocks whatever the considered watershed and the seasons. C/N ratios and $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ values of BL samples are also very homogeneous and similar to SL and bedrocks samples. However, BL samples present some higher carbonates content (37 to 40 %) and weaker carbon and nitrogen percentages (0.51 to 0.77 % and 0.07 to 0.10 %). Such differences appear very weak and SL and BL content are quite close.

C/N and $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ values are summarized in figure III-13.

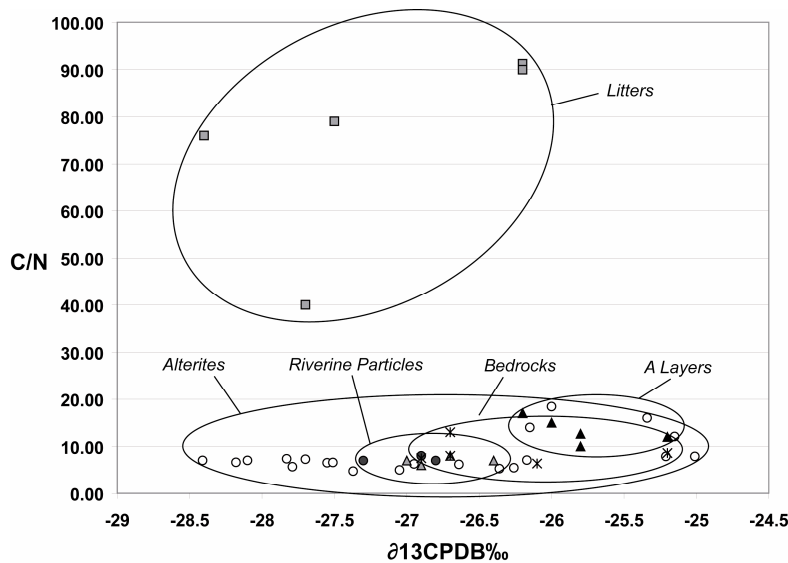


Figure III-13: C/N versus $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ values of the studied samples.

5 – Discussions

5 – 1 – Definition of fossil organic markers

Samples were subjected to an important analytical panel in the aim to distinguish fossil organic matter (FOM) contained in rocks and the recent organic matter (ROM) produced by the biomass in the whole studied pools.

Litters and bedrocks $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ values are too much similar (respectively -26.2 to -28.4 ‰ and -26.8 to -25.2 ‰), and do not allow the discrimination between FOM and ROM. C/N, HI values differ in litters and bedrocks. Indeed, C/N-HI high values are observed in litters while C/N-HI low values in bedrocks. But intermediate values obtained in potentially mixed layers such as A, can be explained as mixing of FOM and ROM or weathered ROM. For these reasons, isotopic, elemental and classical Rock Eval investigations can not allow the identification of FOM or ROM markers in ours samples.

Concerning Rock-Eval pyrolysis, Copard *et al.* (2006) focused their study on the aspect of the Rock Eval S2 signals of same studied samples. Their decomposition model allowed them to individualise six clusters (F1, F2, F3, F4, F5 and F6) (tables 1 and 2) according to their releasing temperature. F1 and F6 clusters were only founded in bedrocks OM from bedrocks and thus were defined as FOM markers.

The optical analysis of the bedrocks samples shows a palynofacies mainly dominated by opaque particles that can represent 65 to 96 % of the observed ones, and in a less proportion by ROAM and GD (between 0 and 25 % and 0 and 10 %, notably in the T4 sample). These opaque particles are not present in litters' samples.

Molecular investigations clearly show that bedrocks organic contents are characterized by a unimodal distribution of n-alkanes, iso or cyclo-alkanes, centred between C_{13} and C_{23} without even or odd numbers of carbons predominance.

5 – 2 – Occurrence of fossil organic Matter in supergene pools

All investigations (optical, geochemical, elemental, isotopic and molecular ones) leaded on riverine particles show that BL and SL organic content are the same as bedrocks one. In detail, the occurrence of alkyl-benzenes, alkyl-phenantrenes, alkyl-pyrenes, alkyl-chrysenes occurrences, underline a bedrocks contribution. The norabietatriene, cadalene and calamene which are characteristic of higher plants resins, are prevalent on summer, this suggests that higher plants significantly contribute to the rivers organic load in summers.

Furthermore, OM quality in the weathering profiles appears to be very close to bedrocks one (opaque particles can reach 5-75 %). Compact fragments of rock samples (pl) of the whole profiles show the same organic contents (low TOC, HI, and high Tmax) than fossil OM. Chemical and isotopic investigations also testify this common feature, with weak C/N ratios (<10) and constant $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ values along studied profiles. In non vegetalized context (A-LAV-2 and A-LAV-3), the OM quality remains unchanged with depth, associated with quite constant HI (<20 mg HC.g⁻¹ TOC), TOC (approximately 0.4 %) and Tmax (between 499 and 608°C). In vegetalized context (ALAV-1, ABRUV-1 and ABLAV-1), surface and TF samples reveal an important ROM contribution (in particular DLC) that decreases with the depth. Such decrease is related with a decrease of TOC, HI and Tmax values. Furthermore, S2 deconvolution of A-LAV1 samples (Copard *et al*, 2006) show the occurrence of F1 (at the bottom) and F6 clusters (along the whole profile). In the otherness, the predominance of low molecular weight n-alkanes observed in the bottom of the studied profiles decrease toward surface (10-50 % of the initial content), replaced by longer n-alkanes, in the C₂₅ with C₃₁ range, with an even carbon numbers predominance, typical of wax cuticle of higher plants contribution. Thus, FOM would be resistant in weathering profiles, but there is obviously a significant ROM contribution in vegetalized context decreasing with depth.

In soil layers, petrographical and geochemical signatures show an organic material that is a mixing of FOM and ROM. Fossil organic markers absent in litters layers significantly occur in A layers and tf samples. Indeed, opaque particles can reach between 5 to 45 % of the total counted particles.

All these results highlight FOM occurrence in the different studied layers and emphasize the fact that FOM contribution should be considered in carbon budgets of modern carbon reservoirs.

5 – 3 – Fate of fossil organic Matter in pools transitions

Continental surfaces are subjected to two principal weathering processes, the (bio)chemical and the mechanical ones. For the studied watersheds, mechanical weathering corresponds to direct erosion (regressive erosion) of the marls by streams responsible for observed badlands morphology. Such erosion exports some riverine particles to rivers (Di-Giovanni *et al.*, 1999a). Chemical weathering, responsible for the weathering profiles formation, corresponds to the hydrolysis of the marls by infiltrated water (Campy and Macaire, 1989). In a vegetalized context, biochemical processes are dominant (bacterial activity and infiltrated water) that authorize soils formations.

Results reveal that the direct transfer from bedrock to riverine particles do not alter FOM, both quantitatively than qualitatively. No mineralization of marls OM occurs during regressive erosion.

The bedrock-weathering profile transfer is accompanied by a degradation of the pyrite (optical analysis), but has no significant incidence on FOM quality, notably in the profiles without vegetation. Chemical weathering seems to have no significant impact on the delivered FOM to modern environment.

In the soil layers and in the upper layers of the weathering profiles in vegetalized context, OM is a mixing between FOM and ROM. The observed decrease of FOM proportion and low molecular weight n-alkanes in vegetelalized context, from bottom to the top, is difficult to assess and could mean FOM degradation and/or a dilution within ROM. However, the transfer between weathering profiles and soils, marked by a strong biological activity, is both accompanied by the disappearance of the F1 cluster. This result clearly illustrates a selective and qualitative alteration of FOM, due to biochemical processes.

6 – Conclusion

We propose a first field study marked by a “multi-pools - multi-analytical” approaches. Indeed, optical, isotopic, chemical and molecular investigations were conducted in order to precise FOC contribution in various continental supergene carbon pools by considering both weathering profile, soils, riverine suspended and bed loads (SL and BL).

The large analytical panel allows us to highlight the complementarity of approaches undertaken. If only the most discriminate analyses (Coupled Gas Chromatography / Mass Spectrometry method and palynofacies method) allow us to differentiate FOM and ROM, other investigations (Rock Eval pyrolysis, elementary analysis, and isotopic ones) reveal additional information and do not invalidate the obtained results.

Results highlight the contribution of FOM, in all studied compartments. Such a contribution should be taken into account in organic stocks and fluxes estimates at local and global scales. Bedrock / weathering profiles transition (chemical weathering) and bedrock / riverine particles one (mechanical weathering) imply little or no qualitative and quantitative changes in FOM. On the other hand, even if significant FOM contribution is observed in A layers, weathering profiles / soils transition evidences for a qualitative change of FOM characterized by its most labile fraction disappearance.

Our results show that the FOM delivery due to continental weathering cannot simply act as a source of carbon to the atmosphere or a direct input in supergene pools. In fact FOM fate appears to be mainly controlled by weathering processes nature. Further studies would be performed to clarify the FOC role in the carbon cycle in terms of delivery and fate.

Acknowledgements :

This work is a contribution of the GIS ‘Bassins de Draix, etude de l’érosion en montagne’ driven by the Cemagref and was financially supported by the CNRS programme INSU PNSE-ACI : Influence de l’érosion sur les flux de matière organique fossile dans les géosystèmes continentaux actuels (sols, cours d’eau) : bassins expérimentaux de Draix, Alpes de Haute Provence, France. The authors warmly thank Nicolle Mathys, Marielle Hatton and Marie Jeanne Milloux for their assistances.

References

- Adams, J., Faure, H., 1996. Changes in moisture balance between glacial and interglacial conditions/ influence on carbon cycle processes. In: Brandson, J., Brown, AG., Gregory, KJ. (Eds), *Global Continental Change: The Context of Paleohydrology*. Geological Society of London, Special Publication 115, pp. 27-42.
- Aitkenhead, JA., McDowell, WH., 2000. Soil C:N ratio as a predictor of annual riverine DOC fluxes at local and global scales. *Global Biogeochemical Cycles* 14, 127-138.
- Amiotte-Suchet, P., 1995. Cycle du carbone, érosion chimique des continents et transferts vers les océans. *Mémoire des Sciences Géologiques* 97, University of Strasbourg.
- Amiotte-Suchet, P., Probst, J.L., Ludwig, W., 2003. Worldwide distribution of continental rock lithology: implications for the atmospheric/soil CO₂ uptake by continental weathering and alkalinity river transport to the oceans. *Global Biogeochemical Cycles* 17(2): 1038.
- Balesdent, J., 1996. The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. *European Journal of Soil Science* 47, 485-493.
- Batjes, NH., 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47, 141-163.
- Behar, F., Beaumont, V., Pentead, H.L De B., 2001. Rock-Eval 6 Technology : Performances and Developments. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* 56(2), 111-134.
- Berner, RA., Lasaga, AC., Garrels, RM., 1983. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effects on atmospheric carbon dioxide over the past 100 millions years. *American Journal of Science* 283, 641-683.
- Berner, RA., 1989. Biogeochemical cycles of carbon and sulphur and their effect on atmospheric oxygen over Phanerozoic time. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 75, 97-122.
- Campy, M., Macaire, J.J., 1989. *Erosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux*, second Edition. Dunod, Paris.
- Carter, MR., Angers, DA., Gregorich, EG., Bolinder, MA., 1997. Organic carbon storage and nitrogen stocks and storage profiles in cool, humid soils of eastern Canada. *Canadian Journal of Soils Science* 77(2), 205-210.
- Combaz, A., 1964. Les palynofaciès. *Revue de Micropaléontologie* 7, 205-218.
- Copard, Y., Di-Giovanni, C., Martaud, T., Albéric, P., Olivier, J.E., 2006. Using Rock-Eval 6 pyrolysis for tracking fossil organic carbon in modern environments : implications for the roles of erosion and weathering. *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 135-153.
- Copard, Y., Amiotte-Suchet, P. Di-Giovanni, C., 2007. Storage and release of fossil organic carbon related to weathering of sedimentary rocks. *Earth and Planetary Science Letters* 258, 345-357.
- Degens, ET., Kempe, S., Richey, JE., 1991. Biogeochemistry of major world rivers. In Degens, ET., Kempe, S., Richey, JE. (Eds), *Biogeochemistry of major world rivers*. SCOPE 42, pp. 323-344.

- Dickens, A.F., Gélina, Y., Hedges, J.I., 2004. Reburial of fossil organic carbon in marine sediments. *Nature* 427, 336-339.
- Di-Giovanni, C., Disnard, J.R., Bichet, V., Campy, M., Guillet, B., 1998. Geochemical characterization of soil organic matter and variability of a past glacial detrital organic supply (Chaillexon lake, France). *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 1057-1069.
- Di-Giovanni, C., Disnard, J.R., Campy, M., Macaire, J.J., 1999a. Variability of the ancient organic supply in modern humus. *Analisis* 27(5), 398-402.
- Di-Giovanni, C., Disnard, J.R., Turpin, S., Bréheret, J.G., 1999b. Estimation de la contribution des matières organiques remaniées au stock organique des sols et sédiments lacustres (bassin de Chaillexon, Doubs, France). *Bulletin de la Société Géologique de France* 170, 121-129.
- Di-Giovanni, C., Disnard, J.R., Macaire, J.J., 2002. Estimation of the annual yield of organic carbon released from carbonates and shales by chemical weathering. *Global and Planetary Change* 32, 327-343.
- Disnar, J.R., Guillet, B., Keravis, D., Di-Giovanni, C., Sebag, D., 2003. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: scope and limitations. *Organic Geochemistry* 34, 327-343.
- Duchauffour, P., 2001. Introduction à la science du sol; végétation, environnement, 6th Edition. Dunod, Paris.
- Espitalié, J., Deroo, G., Marquis, F., 1985. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* 40(5), 563-579.
- Eswaran, H., Van Den Berg, E., Reich, P., 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal* 57, 192-194.
- Holland, H.D., 1978. *The Chemistry of Atmosphere and Oceans*. Wiley Interscience Publishers.
- Kao, S.J., Liu, K.K., 1996. Particulate organic carbon export from a subtropical mountainous river (Lanyang Hsi), in Taiwan. *Limnology and Oceanography* 41, 1749-1757.
- Kaufmann, R.K., Stock, J.H., 2003. Testing hypotheses about mechanisms for the unknown carbon sink : a time series analysis. *Global Biogeochemical Cycles* 17(2), 1072. DOI: 10.1029/2002GB001962.
- Lafargue, E., Marquis, F., Pilot, D., 1998. Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production and soil contamination studies. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* 53(4), 421-437.
- Lichtfouse, E., Bardoux, G., Mariotti, A., Balesdent, J., Ballentine, D.C., Mack, S.A., 1997a. Molecular ¹³C and ¹⁴C evidence for the allochthonous and ancient origin of C₁₆-C₁₈ n-alkanes in modern soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 1891-1898.
- Lichtfouse, E., Budzinski, E., Garrigues, P., Eglinton, T.I., 1997b. Ancient polycyclic aromatic hydrocarbons in modern soils: ¹³C, ¹⁴C and biomarkers evidence. *Organic Geochemistry* 26, 353-359.
- Ludwig, W., Probst, J.L., Kempe, S., 1996. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles* 10(1), 23-41.

- Matys, N., 2006. Analyse et modélisation à différentes échelles des mécanismes d'érosion et de transport de matériaux solides. Cas des petits bassins versants de montagne sur marnes (Draix, Alpes de Haute Provence). Doctoral thesis. Polytecnic national institut of Grenoble.
- Noel, H., 2001. Caractérisation et calibration des flux organiques sédimentaires dérivant du bassin versant et de la production aquatique (Annecy, le Petit Lac)- Rôles respectifs de l'Homme et du Climat sur l'évolution des flux organiques au cours des 6000 dernières années. Doctoral thesis. University of Orléans.
- Otto, A., Simoneit, B.R.T., 2001. Chemosystematics and diagenesis of terpenoids in fossil conifer species and sediment from the Eocene Zeitz formation, Saxony, Germany. *Geochimica and Cosmochemica Acta* 65, 3505-3527.
- Petsch, ST., Berner, RA., Eglinton, TI., 2000. A field study of the chemical weathering of ancient sedimentary organic matter. *Organic Geochemistry* 31, 475-487.
- Probst, JL., 1992. Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale, Mécanismes, bilan global actuel et fluctuation au cours des 500 derniers millions d'années. Mémoire des Sciences Géologiques 94. University of Strasbourg.
- Raymond, P.A., Bauer, J.E., 2001, Riverine export of aged terrestrial organic matter to the North Atlantic Ocean. *Nature* 409, 497-500.
- Sebag, D., Di Giovanni, C., Ogier, S., Mesnage, V., Laggoun-Défarge F., Durand, A., 2005. Inventory of sedimentary organic matter in modern wetland (Marais Vernier, Normandy, France) as source-indicative tools to study Holocene alluvial deposits (Lower Seine Valley, France). *International Journal of Coal Geology* 67, 1-16.
- Sebag, D., Copard, Y., Di-Giovanni, C., Durand, A., Laignel, B., Ogier, S., Lallier-Verges, E., 2006. Palynofacies as useful tool to study origins and transfers of particulate organic matter in recent terrestrial environments: Synopsis and prospect. *Earth-Science Reviews* 79, 241-259.
- Tyson, R.V., 1995. Sedimentary organic matter : organic facies and palynofacies. Chapman et Hall, London

C) Mise en évidence de la contribution en carbone organique fossile dans les compartiments étudiés : résultats mission 2006

Cette partie porte sur l'étude des échantillons prélevés durant les deux campagnes de terrain de 2006 (124 échantillons), issus des profils d'altération 06-LA A, LA A R, 06-LA S2, 06-BRU S1, BRU S1 Lat, 06-BRU S3 et BRU S3 Lat. A ceux-ci s'ajoutent 84 échantillons de particules fluviales et 10 de roches. Ce second travail repose sur des investigations optiques plus élaborées²⁹(palynofacies, mesure du pouvoir réflecteur), géochimiques (Pyrolyse Rock-Eval) mais aussi sur l'analyse de la phase minérale (ICP : Inductively Coupled Plasma Emission spectrometry).

C-1) Analyse optique (Palynofacies)³⁰

C-1-1) Particules observées

Cinq grandes classes de particules organiques ont été définies à partir de différents critères morphologiques et texturaux (observation des palynofaciès en lumière transmise et réfléchie) : les débris ligno-cellulosiques, les débris opaques, les amorphes, les débris gélifiés, et les éléments figurés.

²⁹ Nous proposons une classification plus complète des particules organiques, notamment au sein des particules amorphes.

³⁰ Les résultats présentés ont été obtenus par palynofacies quantitatif. Nous choisissons dans un premier temps de les présenter selon un mode classique (palynofacies qualitatif) afin que le lecteur puisse mieux appréhender par la suite les apports de l'approche quantitative mise au points dans le cadre du présent travail (cf. § IV).

Les débris ligno-cellulosiques (LC)

Cette famille regroupe l'ensemble des particules issues de la segmentation de tissus ligno-cellulosiques de macrophytes terrestres. La préservation de ce type de tissus est accrue par la stabilité, la résistance et la nature hydrophobique de la lignine (Tyson, 1995). Ces particules, de dimensions très variables (de quelques μm à plusieurs centaines μm), ont été partagées en 3 grandes classes (figure III-14) :

- Les particules ligno-cellulosiques translucides (LCT) montrent une structure interne encore visible. Ce type de particules, généralement incolore ou jaunâtre, est translucide en lumière naturelle transmise et apparaît noir en lumière réfléchie.

- Les particules ligno-cellulosiques dégradées sombres (LCDs) montrent également une structure interne visible mais un stade de dégradation et/ou d'oxydation plus avancé leur confère une couleur marron-rougeâtre sombre. Ce type de particules présente une très légère réflectance en lumière réfléchie (R_0 de 0,2 à 0,4 %).

- Les particules ligno-cellulosiques dégradées gélifiées (LCDG) gardent des traces de structures internes mais commencent à être fortement gélifiées. Elles correspondent à un stade plus avancé de dégradation leur conférant une teinte orangé-rougeâtre en lumières transmise et réfléchie.

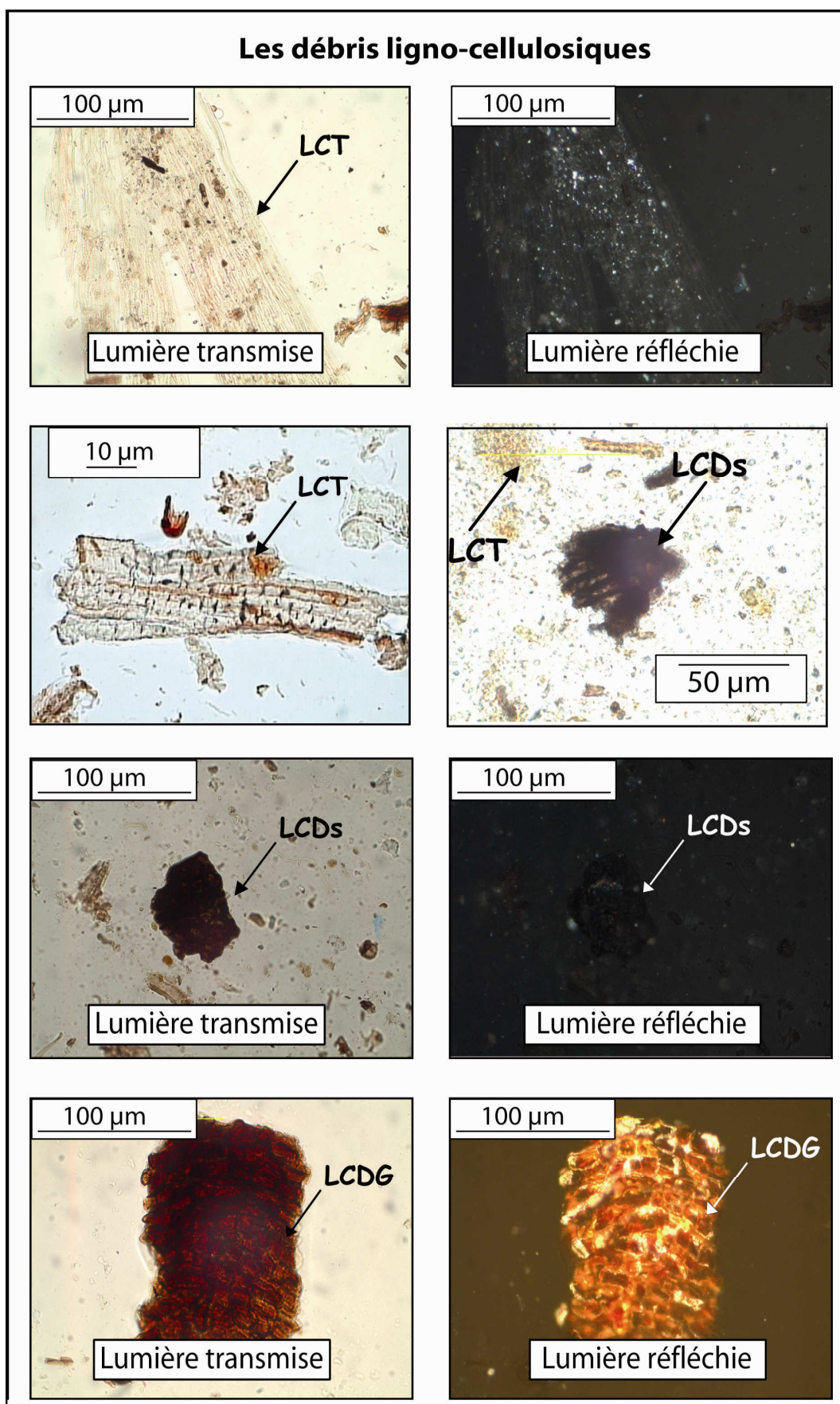


Figure III-14 : Particules lignocellulosiques translucides (LCT), dégradées sombres (LCDs), et dégradées gélifiées (LCDG).

Les particules opaques (LCO)

Ces particules sont entièrement opaques en lumière naturelle transmise. Leurs dimensions varient de quelques μm à une centaine de μm et nous les subdivisons en cinq catégories selon leurs morphologies (figure III-15) :

- Les débris ligno-cellulosiques opaques à contours francs et réguliers présentant une forme allongée (LCOal).

- Les débris ligno-cellulosiques opaques à contours francs et réguliers de forme conchoïdale (LCOconc).

- Les débris ligno-cellulosiques opaques présentant une forme complexe (LCOc).

- Les débris ligno-cellulosiques opaques à contours francs et réguliers présentant une forme trapue (LCOtr).

- Les débris ligno-cellulosiques opaques présentant un éclat brillant en lumière réfléchie (LCO r).

Ces particules possèdent toutes une forte réflectance (R_0 variant de 1 à 5 % environ). Les LCO r se distinguent par une réflectance encore plus fortes (R_0 pouvant dépasser 7%)

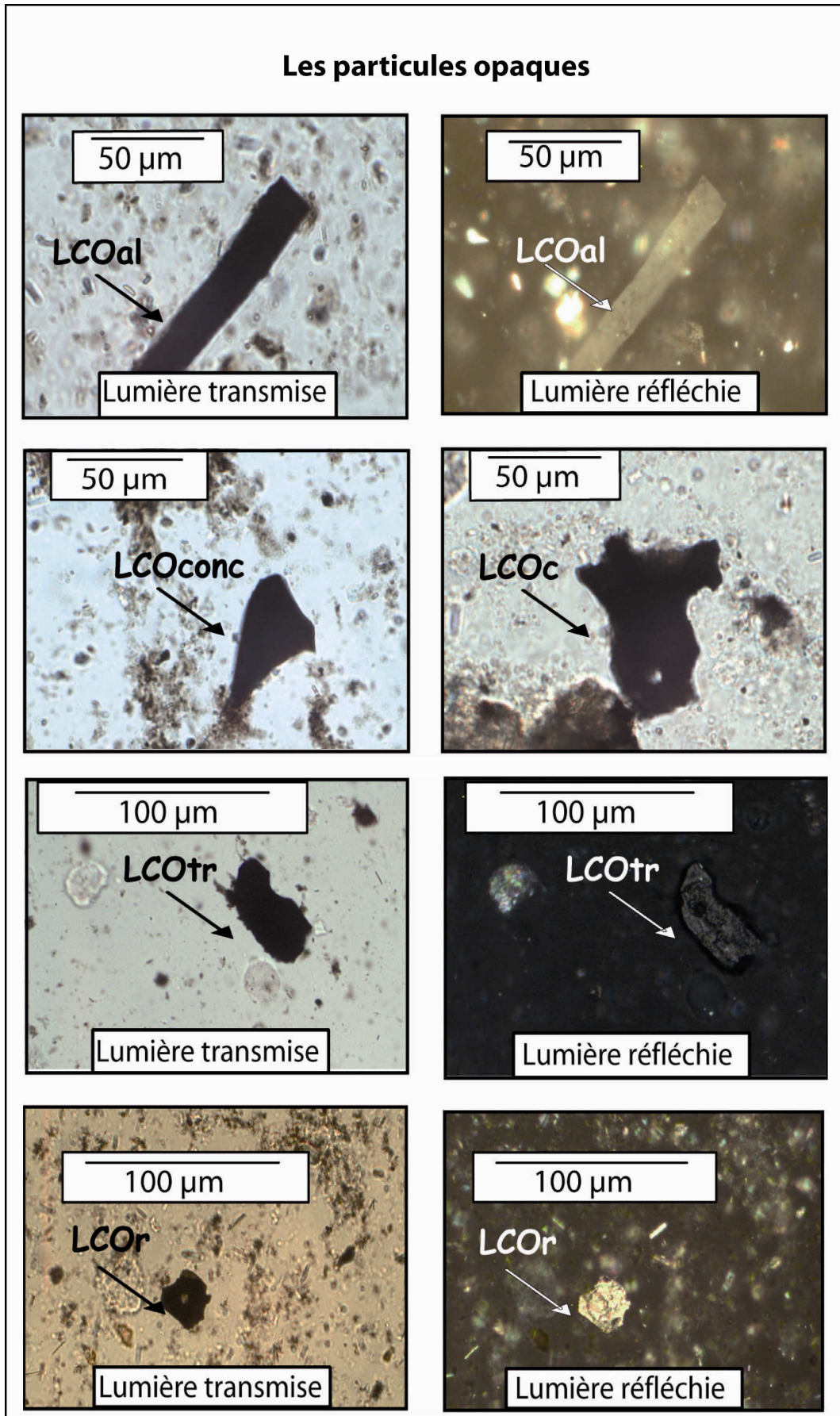


Figure III-15 : Particules lignocellulosiques opaques, allongées (LCOal), trapues (LCOtr), de formes complexes (LCOc), de formes conchoïdales (LCOcon), et fortement réfléchissantes (LCOc).

Les particules amorphes

Les matières organiques amorphes ne présentent aucune structure ou forme particulière remarquables. Cette famille se subdivise en quatre classes (figure III-16).

- Les matières organiques amorphes rougeâtres (MOAr) sont des groupements de particules colloïdales rougeâtres et sombres en lumière transmise. Ces particules sont souvent associées à une matière minérale et parfois à de la pyrite. Elles prennent l'aspect d'une matrice noire en lumière réfléchie, parsemées d'éléments minéraux aux éclats métalliques lorsque ceux-ci sont présents. Ces particules sont généralement de petites tailles, de l'ordre de la dizaine de μm , bien que certaines dépassent 100 μm .

- Les amorphes gélifiés (AG) sont des particules de MO entièrement gélifiées ne présentant plus aucune structure interne. Elles possèdent une teinte orangé-rougeâtre en lumières transmise et réfléchie. Ces particules, de tailles variables, peuvent avoir de très grandes dimensions et atteindre plusieurs centaines de μm de long.

- Les matières organiques amorphes granulaires claires (MOAgc) sont des groupements de particules colloïdales grisâtres ou jaunâtres en lumière transmise. Elles apparaissent opaques, ou présentent une très légère teinte orangée en lumière réfléchie. Leurs dimensions sont très variables et évoluent entre quelques μm à une centaine μm .

- Les matières organiques amorphes opaques (MOAO) sont des groupements de particules sombres aux contours diffus relativement denses. A l'instar de la MOAr, ces particules sont souvent associées à une matière minérale diffuse. Leur taille est généralement petite, bien que certaines atteignent plusieurs dizaines de μm .

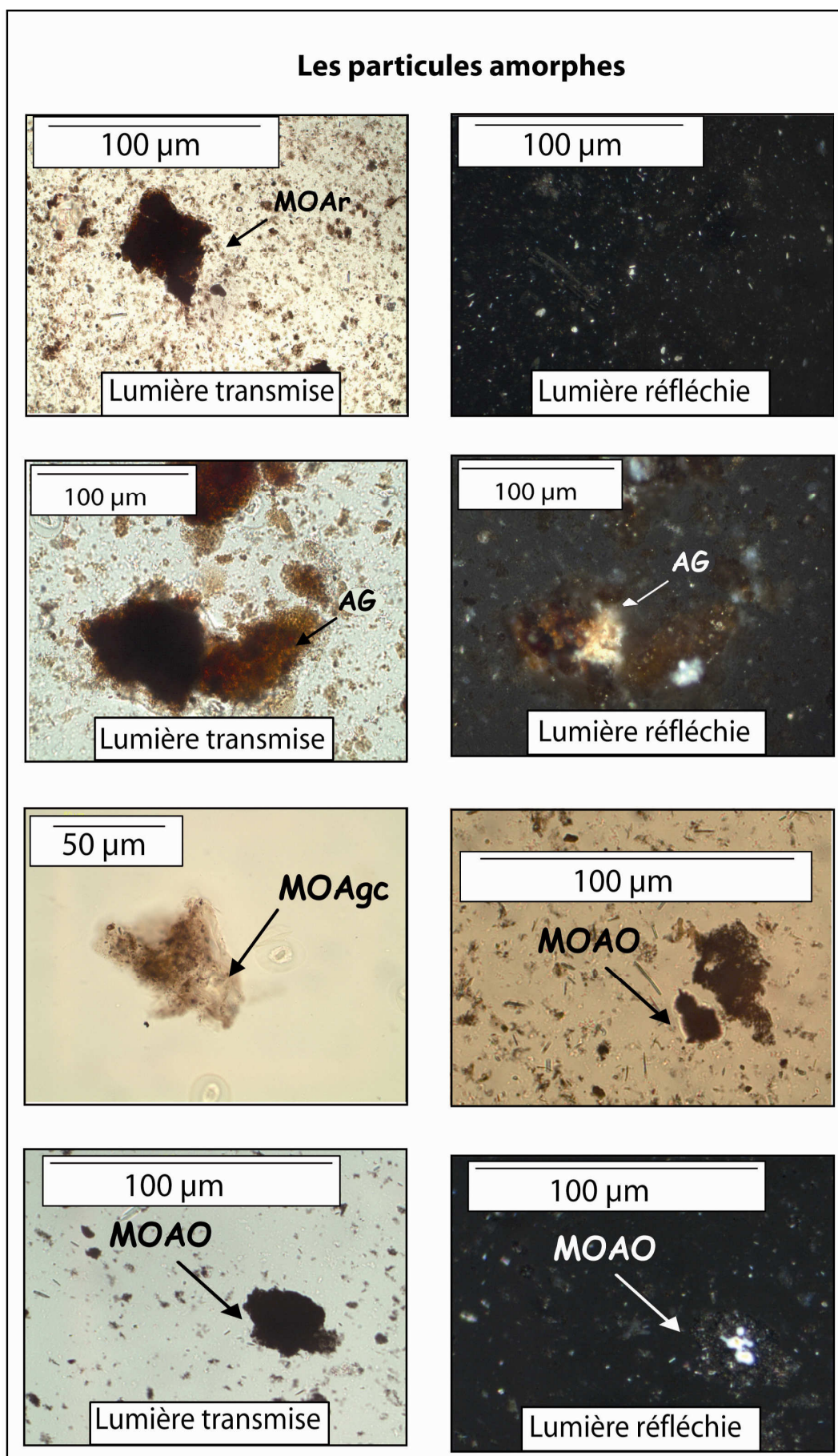


Figure III-16 : Particules amorphes, rougeâtres (MOAr), granulaires claires (MOAgc), opaques (MOAO), et gélifiées (AG).

Les débris gélifiés (DG)

Les débris gélifiés se présentent sous forme de particules de tailles variables, aux contours francs et à textures homogènes. Ils peuvent parfois présenter une structure interne visible. Ces particules, généralement de petites dimensions (de l'ordre de la dizaine μm), se distinguent selon deux classes (figure III-17) :

- Les particules de couleur orangée entièrement transparentes en lumière transmise (DG).
- Les particules dont les pourtours sont orangés et transparents, et dont les surfaces intérieures apparaissent sombres en lumière transmise (DGO).

Ces deux types de particules présentent une forte réflectance et il est parfois difficile de les distinguer des LCO en lumière réfléchie.

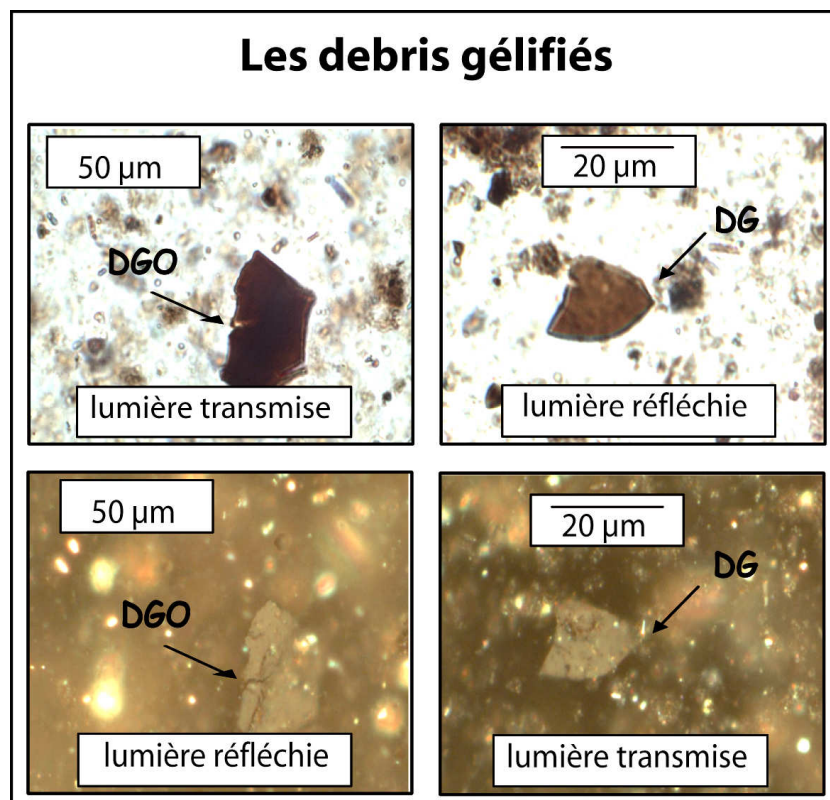


Figure III-17 : Débris gélifiés (DG) et débris gélifiés opaques (DGO).

Les éléments figurés

Ces éléments regroupent l'ensemble des particules organiques dont les morphologies particulières permettent une identification immédiate. Trois classes ont été distinguées (figure III-18) :

- Les filaments mycéliens (Myc) sont des particules allongées dont la couleur évolue du brun clair au marron selon l'état d'oxydation. Ces éléments sont de tailles très variables et peuvent dépasser plusieurs centaines de μm de longueur.

- Les spores et pollens (SO-PO) sont les téguments de cellules reproductrices de la macro-flore. Ils possèdent généralement des formes arrondies et translucides, bien que certaines particules, ayant subi une diagénèse précoce, présentent une couleur orange-brune. Ces particules sont généralement de petites dimensions (de l'ordre de la dizaine de μm).

- Les fragments de cuticule (Mbr) sont des résidus des membranes externes de l'épiderme des végétaux supérieurs. Ils dérivent principalement des feuilles mortes et leur état de conservation dépend essentiellement de leur composition initiale et de leur degré de fragmentation. Ces particules de tailles variables, et reconnaissables par leur teinte brune, peuvent atteindre de très grandes dimensions (plusieurs centaines de $100\ \mu\text{m}$ de long).

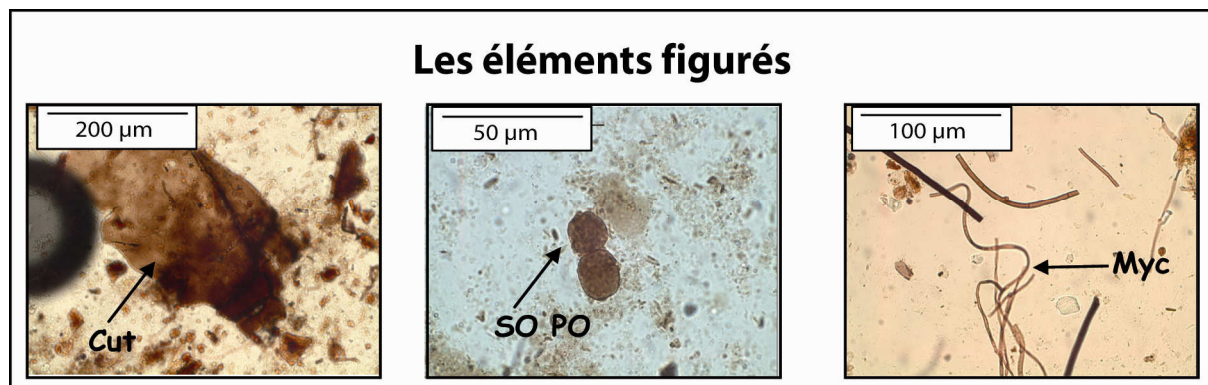


Figure III-18 : Eléments figurés, cuticules (Cut), spores et pollens (SO PO) et mycélium (Myc).

La pyrite

Les particules de pyrite observées (figure III-19) ont souvent des formes rhomboïdales et apparaissent opaques en lumière transmise. Elles présentent par contre un fort éclat métallique en lumière réfléchie. Leurs dimensions sont modestes, de l'ordre de la dizaine de μm .

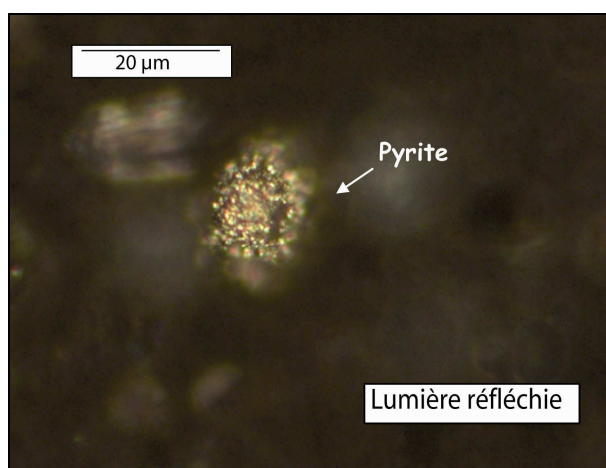


Figure III-19 : Particule de pyrite rhomboïdale.

C-1-2) Echantillons du bassin versant du Laval

Les différentes particules observées par type d'échantillon (PL, TF, horizons A et particules fluviatiles) sont présentées en annexes 3 et 4. Le détail des comptages surfaciques est présenté dans les annexes 8 à 12.

C-1-2-1) Profil A-LAV1 (figure III-20)

Le profil A-LAV1 est un profil altérite / horizon A, situé en contexte végétalisé sur roche callovo-oxfordienne.

Le contenu organique des échantillons de ce profil est majoritairement dominé en profondeur par les LCO, MOAr et DG, et en surface, par les LC et AG. Plus précisément, du sommet vers la base, les LCO augmentent de 5,4 à plus de 30 %, les MOAr de 2 à 17,3 % et les DG de 2 % à 30,2 %. Les autres types de particules présentent une tendance inverse et diminuent avec la profondeur. Ainsi les particules de LC chutent de 60,6 % à 6 %, les particules d'AG de 29,3 % à 4,4 % et les MOAgc de 10 à 3%. Seuls les éléments figurés semblent relativement constants le long du profil et varient entre 1,9 et 7,4 %. La pyrite n'est présente que dans les échantillons inférieurs, et sa contribution n'excède pas 0,8 %

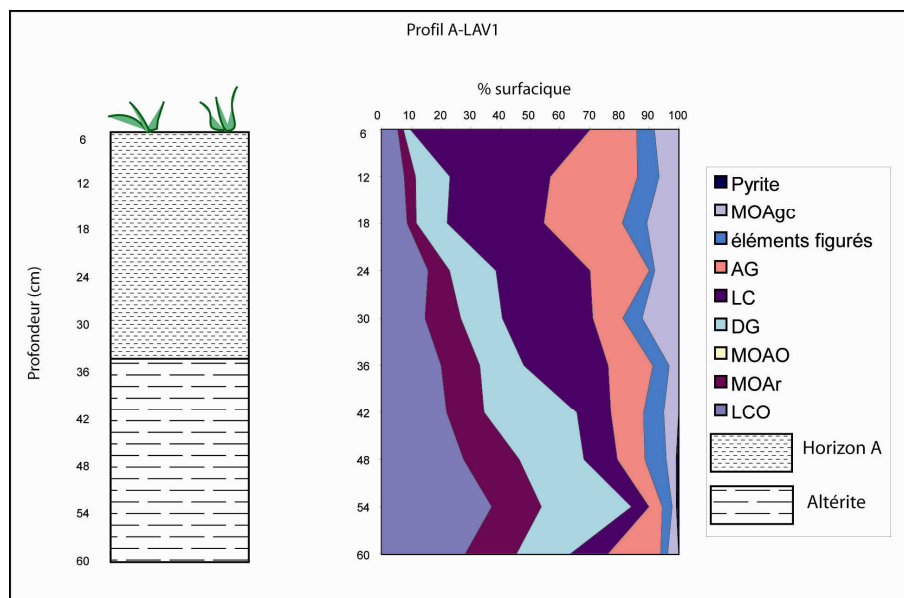


Figure III-20 : Palynofacies observées dans les échantillons du profil A-LAV1.

C-1-2-2) Profils 06-LA A et LA A R (figure III-21)

06-LA A et LA-A R constituent le même profil échantillonné à six mois d'intervalle. Il s'agit de profils Roches / Altérites situés en sommet de crête dépourvue de végétation sur roche callovo-oxfordienne.

- **06-LA A** : La MO est constituée de LCO (40 % environ), de MOAr (27 % environ) et de DG (20 % environ). Quelques particules de MOAgc et d'éléments figurés peuvent être observées (<3,9 %), particulièrement dans les échantillons proches de la surface. Nous observons des particules de pyrite dans l'ensemble des échantillons, leur contribution augmentant avec la profondeur (de 2 à 14,1 % des surfaces comptées).

- **LA A R** : Les particules observées au sein du profil LA A R sont identiques. Les % surfaciques représentatifs des LCO, MOAr et DG atteignent en moyenne 45 %, 30 % et 20 %. Seules quelques particules de pollens (éléments figurés), ainsi que de MOAgc sont observées (<1,2 %). Les particules de pyrite, peu présentes, évoluent entre 0 et 5 %.

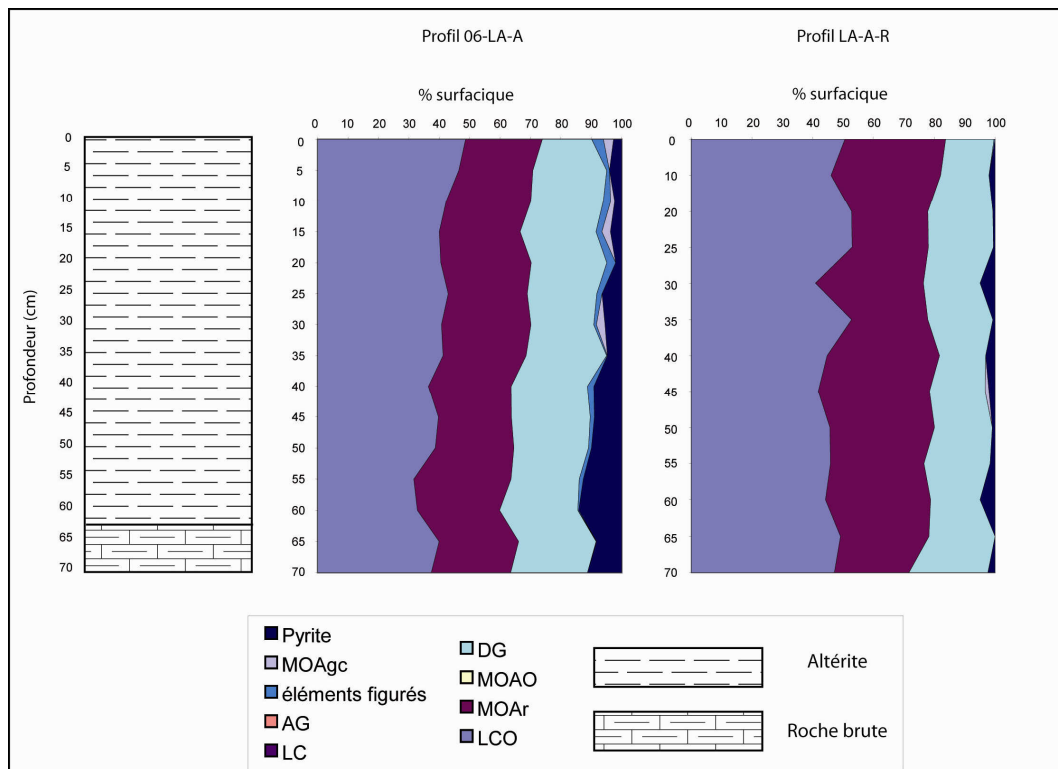


Figure III-21 : Palynofacies observés dans les échantillons des profils 06-LA A et LA A R.

C-1-2-3) Profil 06-LA S2 (figure III-22)

Profil situé au sommet de crête sous couvert forestier et sur roche callovo-oxfordienne.

- **06-LA S2, échantillons de sol :** Du sommet à la base ont été distingués trois échantillons correspondant aux horizons OL, OH, et A. L'échantillon OL est largement dominé par les LC (plus de 50 % des surfaces comptées) tandis que les particules d'AG, d'éléments figurés et de MOAgc ne dépassent pas 20 %. L'échantillon OH est comparable, et seules les particules d'AG (35 %) augmentent au détriment des LC, éléments figurés et MOAgc. L'échantillon d'horizon A diffère par contre des précédents : nous observons en son sein de nombreuses particules de LC, AG et MOAgc (36,9 , 36,1 et 3 %), mais aussi des LCO, MOAr et DG (7,6, 6,7 et 4,6 % des surfaces comptées).

- **06-LA S2, échantillons PL :** Le contenu organique des échantillons PL est similaire à ceux des profils 06-LA-A et LA A R. Les proportions en LCO, MOAr et DG sont relativement constantes et oscillent respectivement autour de 40 %, 32 % et 26 %. Nous observons aussi quelques éléments figurés, de l'ordre de 5 % de particules comptées. La pyrite est présente dans l'ensemble des échantillons et augmente progressivement avec la profondeur (de 0,7 à 10,3 % des particules comptées).

- **06-LA S2, échantillons TF :** Le contenu organique des échantillons TF est un mélange hétérogène de particules de types LCO, MOAr, DG, LC, AG, éléments figurés et MOAgc. Les proportions relatives de LCO, MOAr et DG augmentent avec la profondeur (respectivement de 10 à 40 %, de 8 à 24 % et de 5 à 20 % des surfaces comptées) tandis que celles des autres types de particules diminuent. Les LC chutent, en effet, de 40,3 à 4 %, les AG de 30 environ à 3 %, les éléments figurés de 17,8 à 0,4% et les MOAgc de 9 à 0 %. Les particules de pyrite sont relativement peu présentes le long de ce profil et leur contribution n'excède pas 0,6 %.

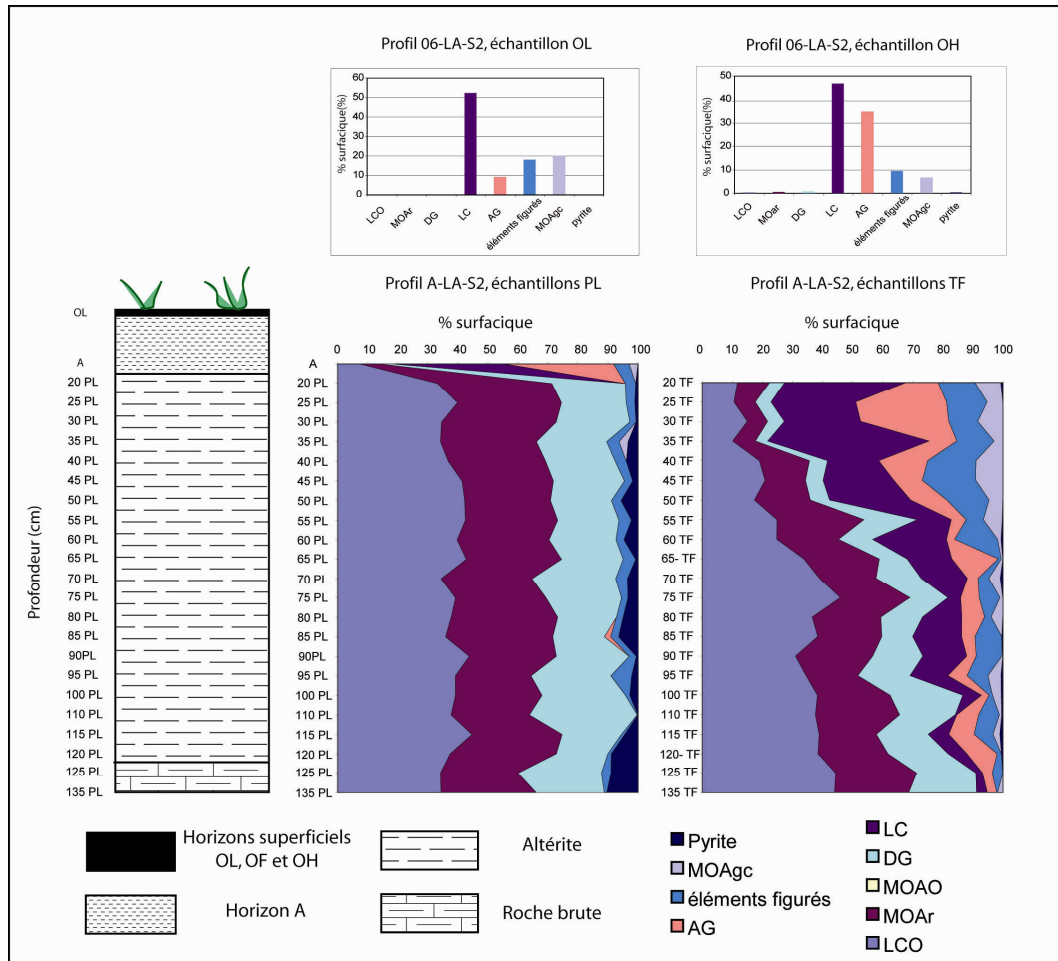


Figure III-22 : Palynofacies observés dans les échantillons du profil 06-LA S2, échantillons PL, TF horizons OL, OH et A.

C-1-2-4) Particules fluviatiles (figure III-23)

La MO des échantillons de MES prélevées à l'exutoire du bassin du Laval est dominée par les LCO (31,1 à 44,7%), MOAr (36,8 et 35,1%) et DG (7,3 et 13,8 %). Les particules de LC, AG, éléments figurés et MOAgc sont moins abondantes et leurs contributions ne dépassent pas 10%. Nous notons la présence de particules de pyrite dans l'ensemble des échantillons (de 1,5 à 11,8% des surfaces comptées).

Les échantillons de CF possèdent un contenu organique similaire.

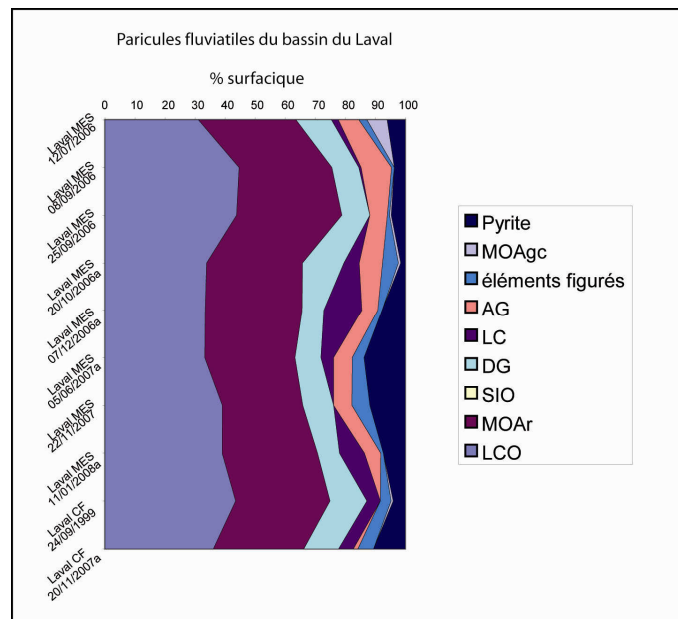


Figure III-23 : Palynofacies observées dans les particules fluviatiles du bassin du Laval.

C-1-3) Echantillons du bassin versant du Brusquet

C-1-3-1) Profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat (figures III-24 et 25 et 26)

Profils situés au sommet de crête sous un couvert forestier et sur roche toarcienne. Le positionnement des échantillons est rappelé en figure III-24.

Les particules organiques observées au sein des échantillons PL, TF et A de ces profils sont présentées dans les annexes 5 et 6. Le détail des comptages surfaciques est présenté dans les annexes 13 et 14.

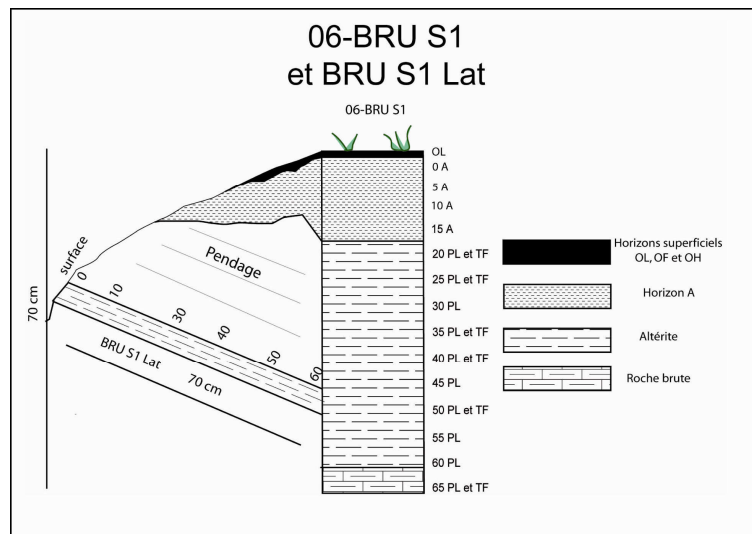


Figure III-24 : Rappel de la position des échantillons des profils 06-BRU-S1 et BRU S1 Lat.

- **06-BRU S1, échantillons de sol (figure 25) :** L'échantillon OL prélevé au sommet du profil est majoritairement constitué de LC (82,7 %) et d'AG (14,2 %). Le contenu organique des quatre échantillons d'horizon A, prélevés entre 0 et 20 cm de profondeur, est plus hétérogène. Plus précisément, les LCO, MOAr, MOAO et DG sont minoritaires en surface (respectivement 10,3 , 3,6 , 0,7 et 1,1 %) et augmentent fortement avec la profondeur (jusqu'à 43,3 , 14 , 5,4 et 9,3 %). Inversement les particules de LC et AG diminuent, de 22,4 à 5,4 %, et de 36,2 à 0 %. Seuls les éléments figurés (7,6 à 29,1 %) et MOAgc (7 à 9,7 %) semblent relativement constants sur cet intervalle.

- **06-BRU S1, échantillons PL (figure 25) :** Les échantillons PL du profil 06-BRU S1 se distinguent en deux ensembles différents. De 20 à 45 cm de profondeur, la MO est en

moyenne constituée de LCO (43 %), de MOAr (33 %), de DG (18 %) et de MOAO (3 %). Les autres types de particules sont inexistantes, à l'exception des MOAgc (< 2 %). De 45 à 65 cm de profondeur, la MO se caractérise par une population de MOAO plus importante (34,5 % en moyenne), par la présence de pollens (éléments figurés, 7 % environ) et par la quasi absence de particules DG (<1,1 %). La contribution des particules de pyrite augmente de façon progressive avec la profondeur, mais ne dépasse jamais 8 % des surfaces comptées.

- 06-BRU S1, échantillons TF (figure 25) : Les échantillons TF peuvent être groupés en deux ensembles différents. La MO des quatre premiers échantillons (entre 20 à 45 cm de profondeur) est constituée de LCO (30 %), de MOAr (20 %), de MOAO (5 %), de LC (7 %), de AG (21 %), d'éléments figurés (8 %), de MOAgc (5,5 %), accompagnée de seulement 0,5 % de pyrite. Les échantillons prélevés à 50 et 65 cm se distinguent par des % de MOAO plus importants (de l'ordre de 30 %) et des % faibles en DG (<1,4 %), AG (<8,9 %) et MOAgc (<2,9 %). La pyrite augmente avec la profondeur, de 1,4 à 4,3 % des surfaces comptées.

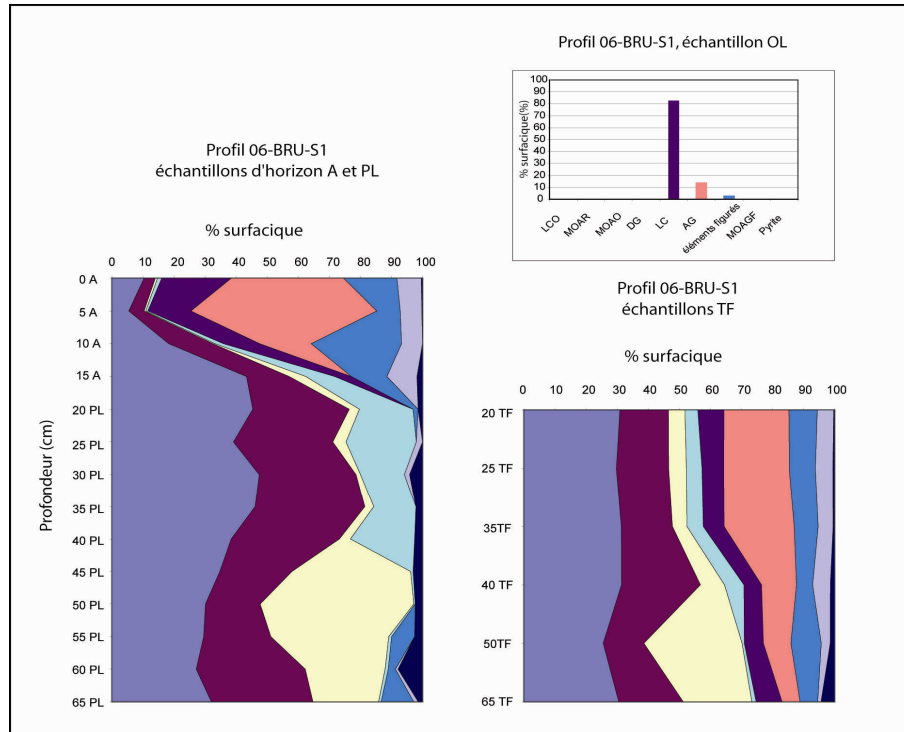


Figure III-25 : Palynofacies observés dans les échantillons du profil 06-BRU S1, échantillons PL, TF, horizons OL et A.

- **BRU Lat, échantillons PL (figure 26)** : Le contenu organique des échantillons du profil BRU S1 Lat (figure III-26) est semblable à celui observé au sein des échantillons PL profonds du profil 06-BRU S1. Aucune tendance ne peut être dégagée sur l'évolution des contributions en pyrite (0,7 à 3,7 % des surfaces comptées).

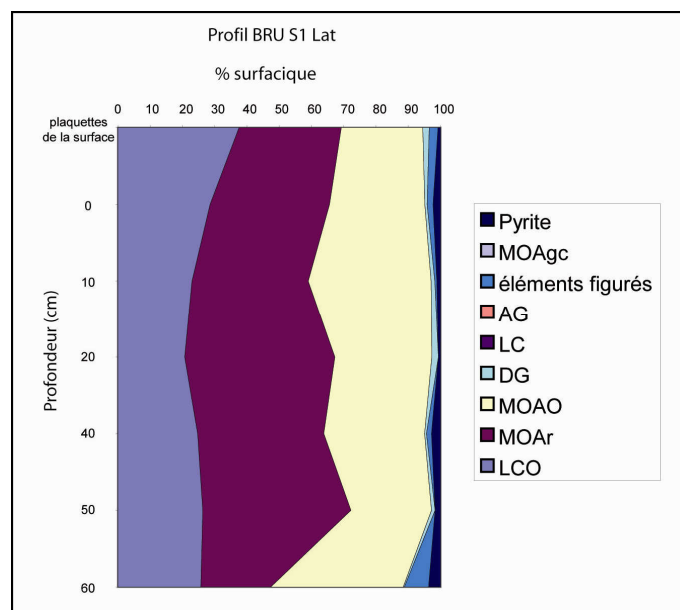


Figure III-26 : Palynofacies observés dans les échantillons du profil BRU S1 Lat.

C-1-3-2) Profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat (figures 27 et 28)

Profils situés sous un couvert forestier et sur roche aalénienne supérieure. Le positionnement des échantillons est rappelé en figure III-27.

Les particules organiques observées au sein des échantillons PL, TF et A de ces profils sont présentées dans l'annexe 7. Le détail des comptages surfaciques est présenté dans l'annexe 15.

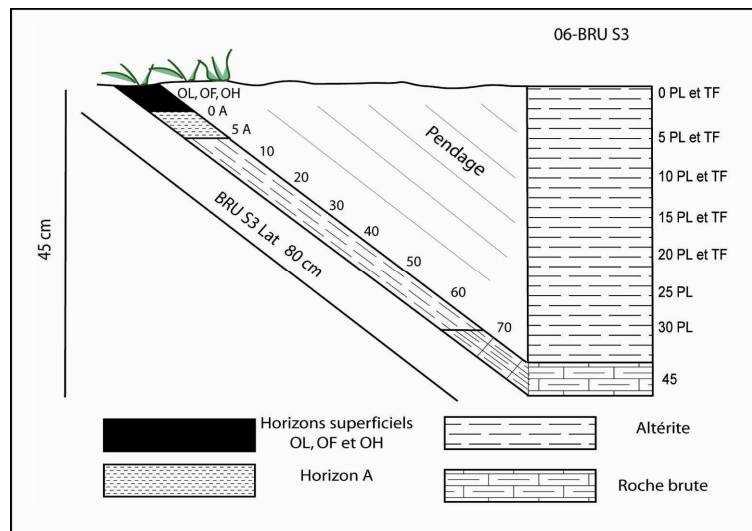


Figure IV- 27 : Rappel de la position des échantillons des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat.

- **06-BRU S3, échantillons PL** : La matière organique des échantillons PL du profil 06-BRU S3 est majoritairement constituée de LCO, MOAr et DG (respectivement 50, 37 et 9 % des surfaces comptées environ). Nous notons la présence de particules de pyrite dans l'ensemble des échantillons (de 1,3 et 5,4 %).

- **06-BRU S3, échantillons TF** : La matière organique des échantillons TF est plus hétérogène. Elle apparait en moyenne constituée de 17 % de LCO, 14 % de MOAr, 1,3 % de DG, 22 % de LC, 32 % d'AG, 9 % d'éléments figurés et de 4 % MOAgc. Les particules de pyrite sont peu nombreuses (<0,2 % des particules comptées).

- **BRU S3 Lat, échantillons de sols** : La MO des échantillons OL, OF et OH est dominée par les particules LC, AG et éléments figurés. Cependant, de l'horizon OL vers l'horizon OH, nous observons une chute des particules LC (de plus de 85 à 40 % environ) au profit des AG

(de 3 à plus de 50 % environ). Les deux échantillons d'horizon A, prélevés à 0 et 5 cm de profondeur présentent un contenu organique très hétérogène. Les particules de LCO, MOAr, DG, éléments figurés et MOAgc augmentent avec la profondeur. Leurs proportions évoluant respectivement de 2,7 à 17,5 %, de 2,5 à 19 %, de 0,4 à 3,3 %, de 5,8 à 10,2 % et de 0 à 5,9 %. Inversement les particules de LC et d'AG diminuent (respectivement de 48,2 à 22,1 %, et de 40,4 à 28,3%).

- **BRU S3 Lat, échantillons PL :** Les échantillons de roches sont constitués de LCO, de MOAgr, et de DG. Les LCO augmentent vers la profondeur (de 35 % environ à 53 % des particules comptées), et inversement, les particules de MOAr diminuent (de 56 % environ à 29 %). Les DG évoluent entre 4,5 et 19,1 %, et la pyrite entre 0 et 10,4 %.

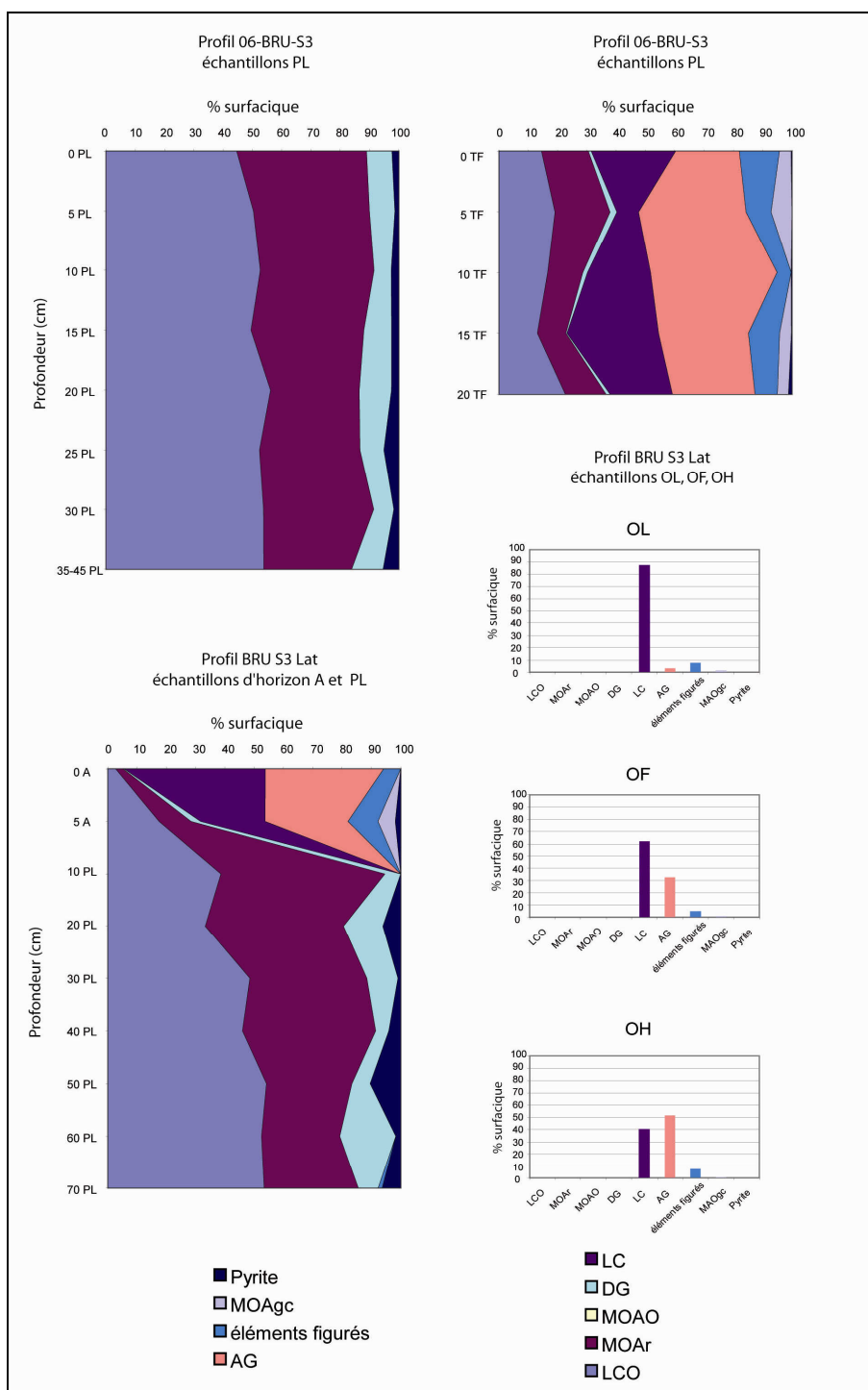


Figure III-28 : Palynofacies observés dans les échantillons des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat, échantillons PL, TF, OL, OF, OH et A.

C-1-3-3) Particules fluviatiles du bassin du Brusquet (figure III-29)

Le détail des comptages est présenté dans l'annexe 16.

La MO de ces échantillons, hétérogène, est majoritairement constituée de particules de LCO (28 et 45,4 %), de MOAr (9,8 et 18,6 %), de MOAO (8,2 et 8,3 %), de LC (5,6 et 20 %), et d'AG (14,8 et 20,4 %). Les contributions respectives en DG, éléments figurés et MOAgc ne dépassent pas 8,4 % des surfaces comptées. L'échantillon de CF prélevé en 1999 possède une MO semblable, tandis que ceux prélevés en 2006 contiennent nettement moins de particules de LC, AG, éléments figurés et MOAgc (<2,5 %). Ces échantillons sont particuliers car ils ont été prélevés dans des retenues naturelles (barrages végétaux) à l'aval des profils 06-BRU S1 (Toarcien) et 06-BRU S3 (Aalénien supérieur) plutôt qu'à l'exutoire du bassin.

Des particules de pyrite sont observées dans l'ensemble de ces échantillons (de 1,6 à 7,2 % des particules comptées).

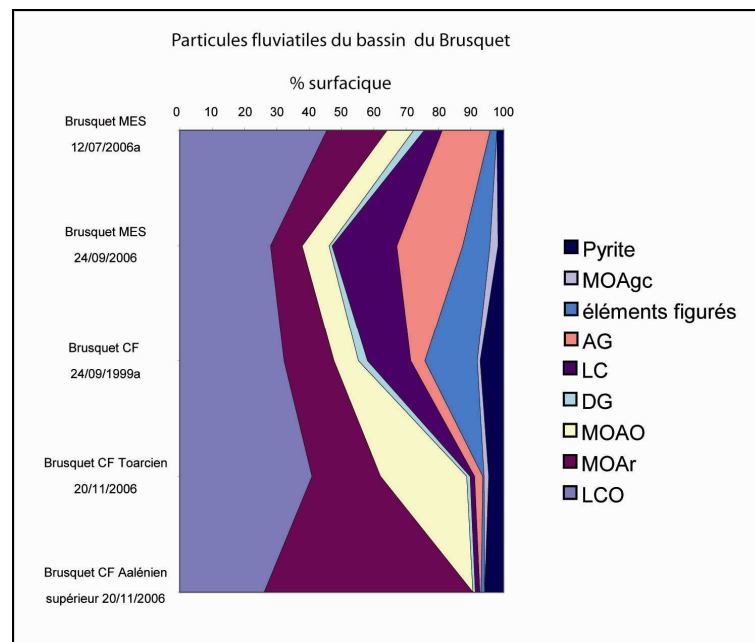


Figure III-29 : Palynofacies observés dans les particules fluviatiles du Brusquet.

C-1-4) Echantillons du bassin versant du Moulin

Le détail des comptages est présenté dans l'annexe 16.

Le contenu organique de ces échantillons de MES (figure III-30) est semblable à celui observées au sein des particules fluviales du Laval. Nous observons des particules de pyrite dans l'ensemble des échantillons, celles-ci représentant de 2,4 à 10,6 % des surfaces comptées.

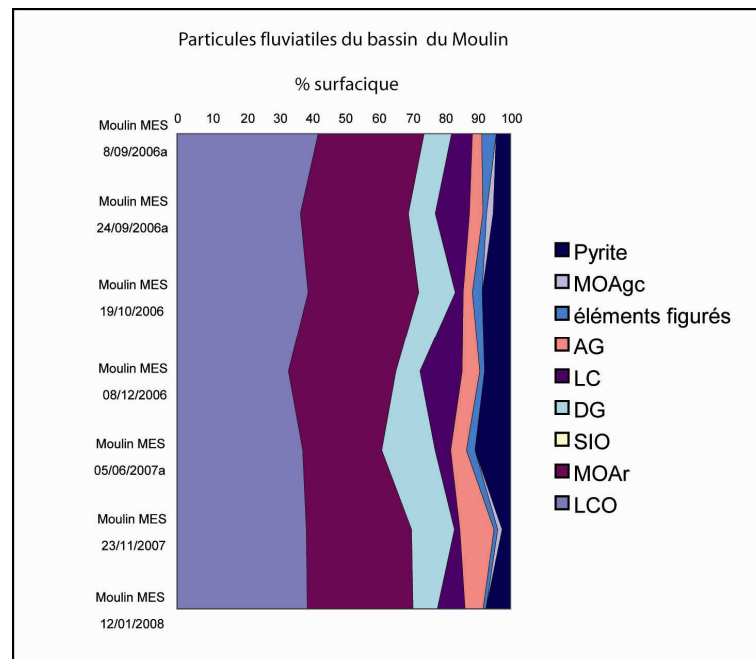


Figure III-30 : Palynofacies observés dans les particules fluviales du Moulin.

C-2) Mesure du pouvoir réflecteur

C-2-1) Bassin versant du Laval

C-2-1-1) Profils 06-LA A et 06-LA S2 (figure III-31)

Six échantillons de roches et d'altérite, deux échantillons de TF et un horizon A ont été soumis à cette analyse. Les particules observées au sein de ces échantillons sont présentées en annexe 17.

L'observation des sections polies de ces échantillons révèle la présence de particules fortement réfléchissantes, dont les morphologies et les dimensions sont comparables à celles des particules DG et LCO. Les pouvoirs réflecteurs (R0%) sont variables et évoluent entre 1,1 % à 4,5 %. Les mesures les plus fréquentes se situent entre 1,5 et 2 %. Seul l'échantillon T5 diffère quelque peu, avec un maximum de mesures situées autour de 2,5 %.

Nous observons, par ailleurs, d'autres types de particules au sein des échantillons TF et A. Elles sont en général de plus grandes tailles (de l'ordre de centaines de μm) et présentent une teinte allant du jaunâtre au rougeâtre. Certaines présentent un début de gélification et un faible pouvoir réflecteur de l'ordre de 0,3 % (ces mesures n'ont pas été prises en compte dans l'établissement des diagrammes de fréquence³¹).

³¹ Ces particules correspondent certainement aux LC ou AG et ne sont pas représentatives de la MOF.

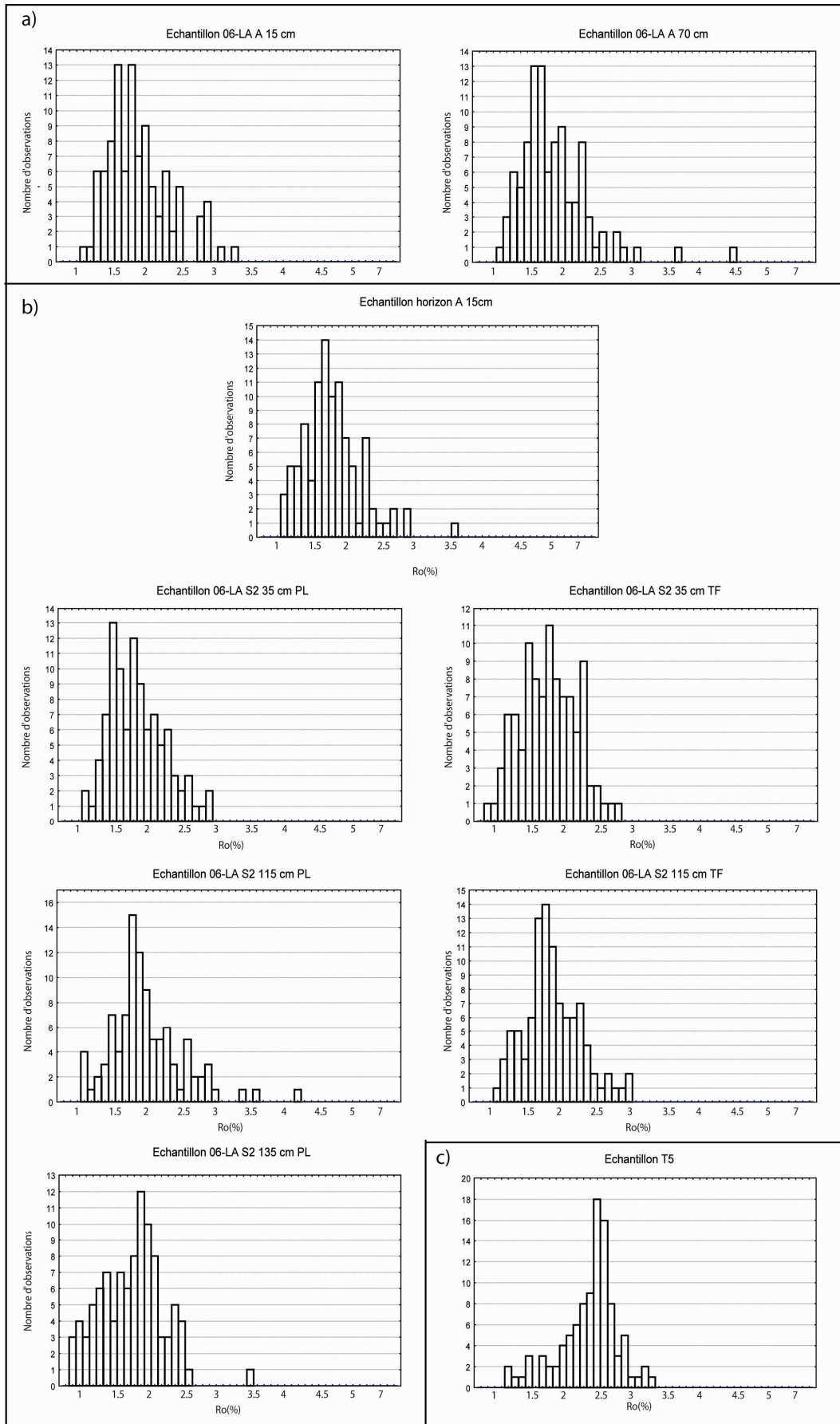


Figure III-31 : Diagrammes de fréquence des mesures du R0 (%) des échantillons des profils 06-LA A (a), 06-LA S2 (b) et de l'échantillon T5 (c).

C-2-1-2) Particules fluviatiles (figure III-32)

Trois échantillons de MES été soumis à cette analyse. Les particules observées au sein de ces échantillons sont présentées en annexe 18.

Nous observons la même population de particules fortement réfléchissantes que dans les échantillons des profils 06-LA A et 06-LA S2. Les pouvoirs réflecteurs sont variables et évoluent entre 1,1 à plus de 7 %. Les mesures les plus fréquentes se situent entre 1,2 et 2,5 %. Ces particules peuvent avoir des formes diverses, et parfois très complexes (présence de vacuoles, cf. annexe 18).

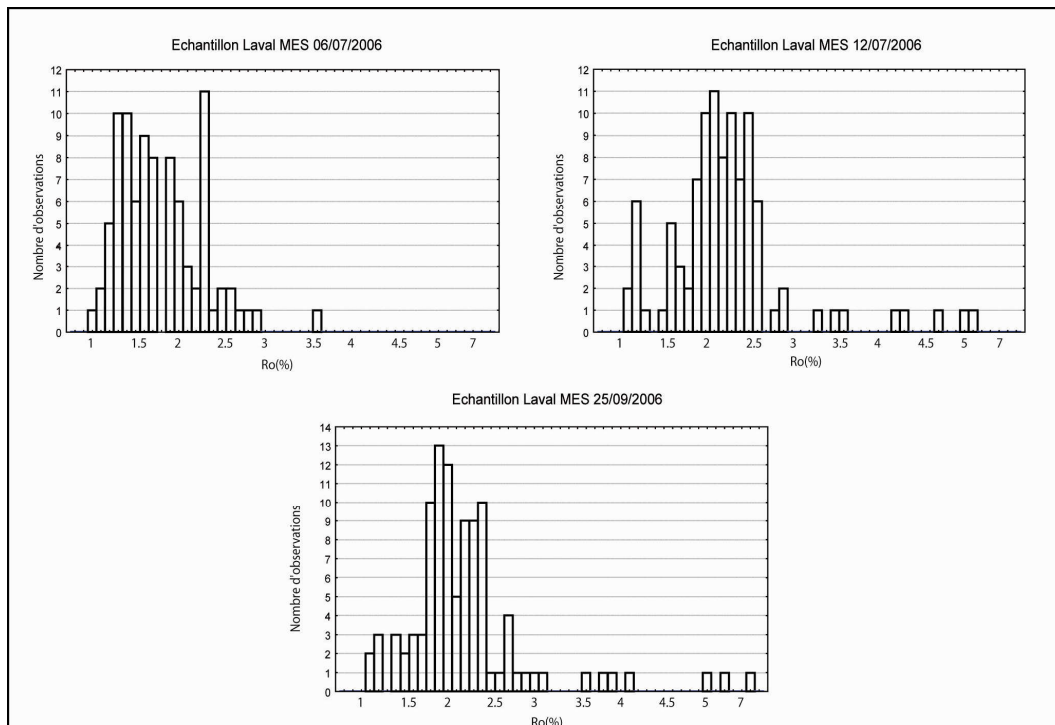


Figure III-32 : Diagrammes de fréquence des mesures du R0 (%) des échantillons de MES du bassin versant du Laval.

C-2-2) Bassin versant du Brusquet

C-2-2-1) Profil 06-BRU S1 (figure III-33)

Deux échantillons PL, deux échantillons TF et un horizon A ont été soumis à cette analyse. Les particules observées au sein de ces échantillons sont présentées en annexe 19.

Nous observons à nouveau de nombreuses particules fortement réfléchissantes, dont les morphologies et dimensions sont comparables à celles des particules DG et LCO. Nous pouvons cependant distinguer les échantillons PL et TF prélevés à 50 cm de ceux prélevés plus près de la surface. Dans les échantillons profonds, les particules organiques possèdent des formes très complexes avec des structures caractérisées par de nombreuses vacuoles. Leurs pouvoirs réflecteurs sont aussi très importants (de 1,5 à plus de 7 %) avec un nombre maximum de mesures situé autour de 4 %. Dans les échantillons supérieurs (PL, TF et A), les particules réfléchissantes sont généralement plus petites et leurs surfaces apparaissent plus ou moins poreuses. Leurs pouvoirs réflecteurs sont plus faibles, majoritairement situés entre 1 et 1,5 %. Ces derniers chiffres doivent être considérés comme des ordres de grandeurs car le faible nombre de mesures réalisés pour ces échantillons (66 pour 06-BRU S1 PL 25 cm, 60 pour 06-BRU S1 TF 25 cm et 38 06-BRU S1 A 10 cm) n'autorise pas l'établissement de valeurs précises de R0 %.

Tout comme pour les échantillons du bassin du Laval, nous observons dans les échantillons TF et A les mêmes particules de plus grandes tailles, certaines possédant un R0 proche de 0,3%.

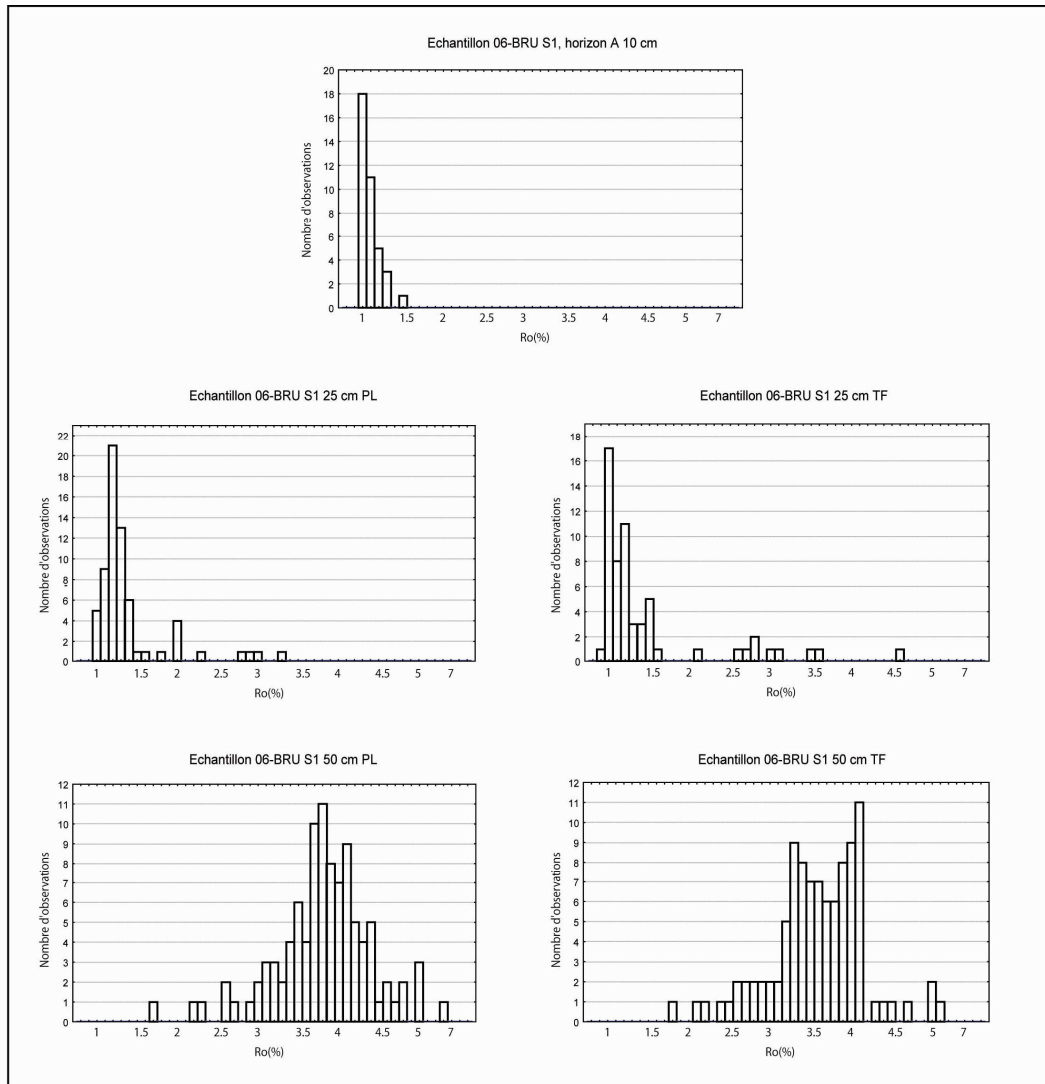


Figure III-33 : Diagrammes de fréquence des mesures du R_0 (%) des échantillons du profil 06-BRU S1.

C-2-2-2) Profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat (figure III-34)

Trois échantillons PL et trois échantillons TF du profil 06-BRU S3 ont été soumis à cette analyse. A ceux-ci, nous avons rajouté deux échantillons PL du Profil BRU S3 Lat. Les particules observées au sein de ces échantillons sont présentées en annexe 20.

La population de particules réfléchissantes de ces échantillons possède des pouvoirs réflecteurs extrêmement dispersés (de 0,9 à plus de 7 %), plus généralement centrés entre 1 et 3%. Nous observons toujours ces mêmes particules orangées de grandes tailles au sein des échantillons TF.

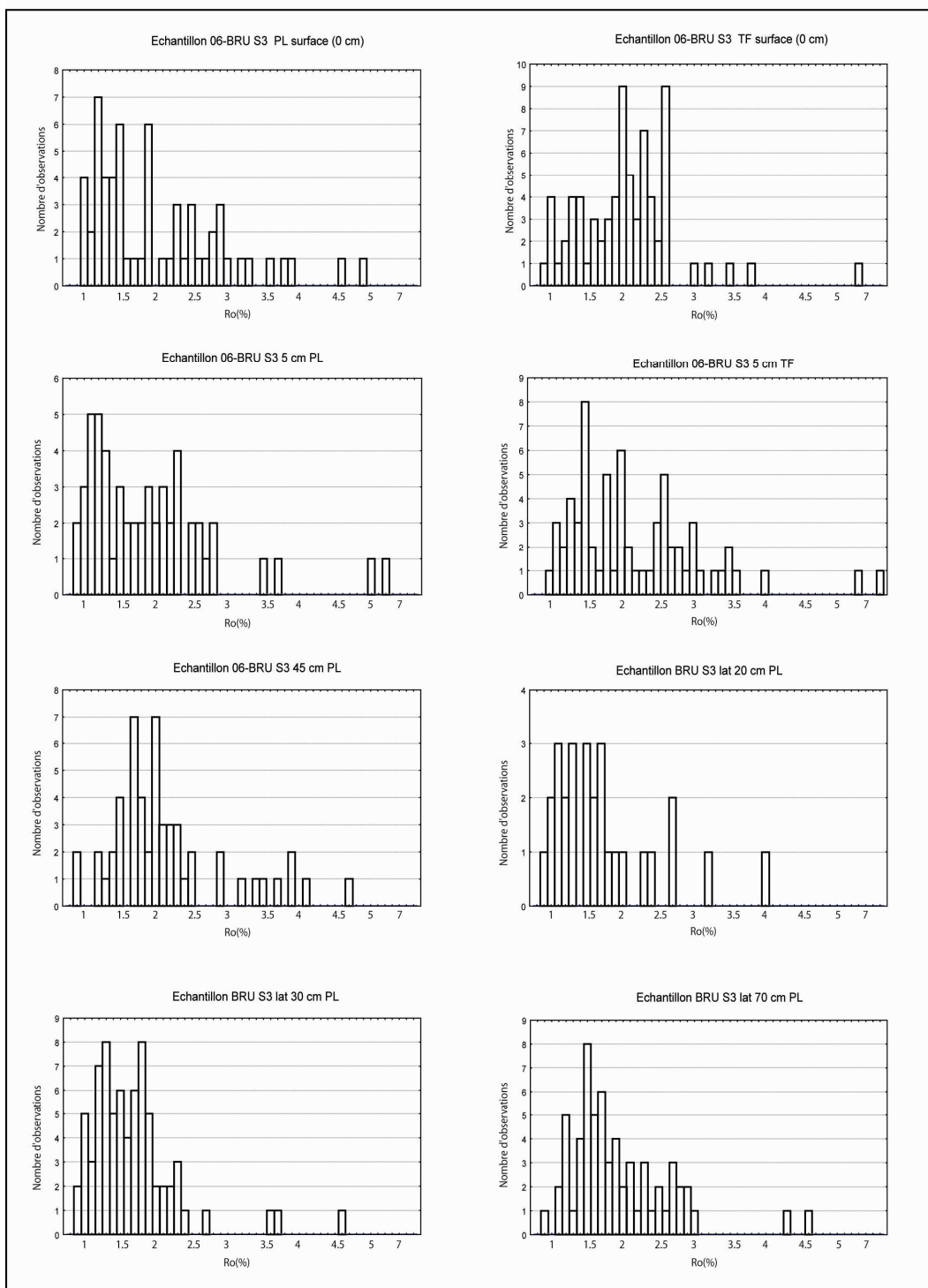


Figure III-33 : Diagrammes de fréquence des mesures du R_0 (%) des échantillons des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat.

C-2-2-3) Particules fluviatiles (figure III-35)

Un seul échantillon de MES, prélevé le 12/07/2006, a été soumis à cette analyse. Les particules observées sont présentées en annexe 21.

Cet échantillon possède toute une gamme de particules aux forts pouvoirs réflecteurs, variant de 1 à 5 %. Leurs morphologies sont diverses et nous observons aussi bien des particules aux formes complexes à éclat métallique que des particules plus ternes et souvent plus trapues. Les particules orangées de plus grandes tailles sont à nouveaux présentes.

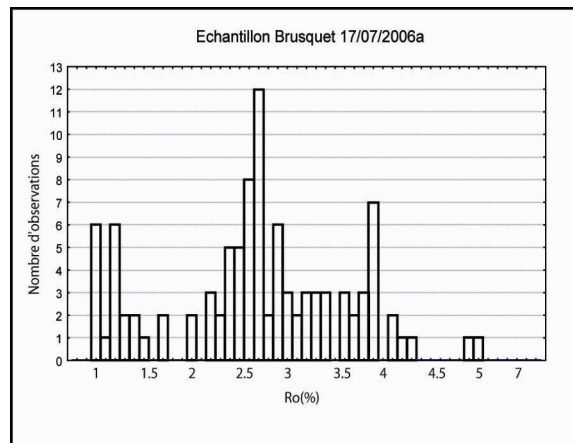


Figure III-34 : Diagramme de fréquence des mesures du R0 (%) de l'échantillon Brusquet MES 12/07/06.

C-3) Pyrolyse Rock-Eval

Les valeurs précises des paramètres mesurés, COT, IH, IO, Tmax, PC (part du COT libéré lors de la phase de pyrolyse) et RC (part du COT libéré lors de la phase d'oxydation), sont rappelées dans les annexes 22 à 28. Dans les paragraphes suivants, nous nous limiterons à la présentation des COT, IH et Tmax.

C-3-1) Bassin versant du Laval

C-3-1-1) Profil A-LAV1 (figure III-35)

Ce profil se caractérise par une forte diminution des paramètres COT et IH de la surface vers les échantillons les plus profonds (1,73 % à 0,3 %, et 180 à 63 mg HC.g⁻¹COT). Les Tmax sont par contre beaucoup plus constants et oscillent autour de 400°C.

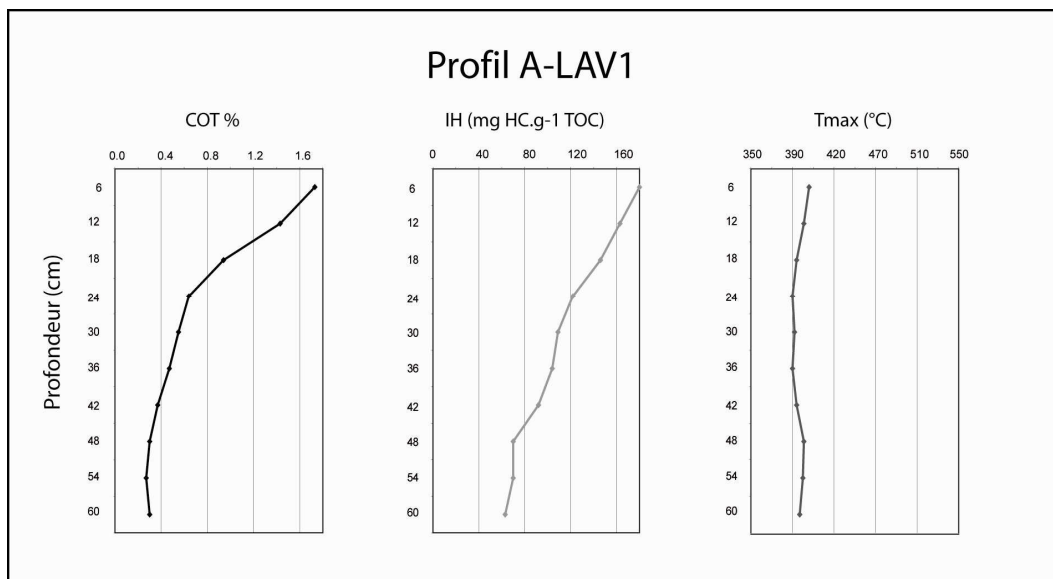


Figure III-35 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax le long du profil A-LA V1.

C-3-1-2) Profils 06-LA A et LA A R (figure III-36)

- **06-LA A** : La MO contenue dans ces échantillons semble très homogène. Les COT et IH sont en effet faibles et constants (entre 0,30 et 0,47 % et entre 12 et 28 mg HC.g⁻¹COT). Les Tmax sont élevés et proches de 520°C.

- **LA A R** : Les résultats obtenus pour les échantillons de LA A R sont identiques à ceux du profil 06-LA A.

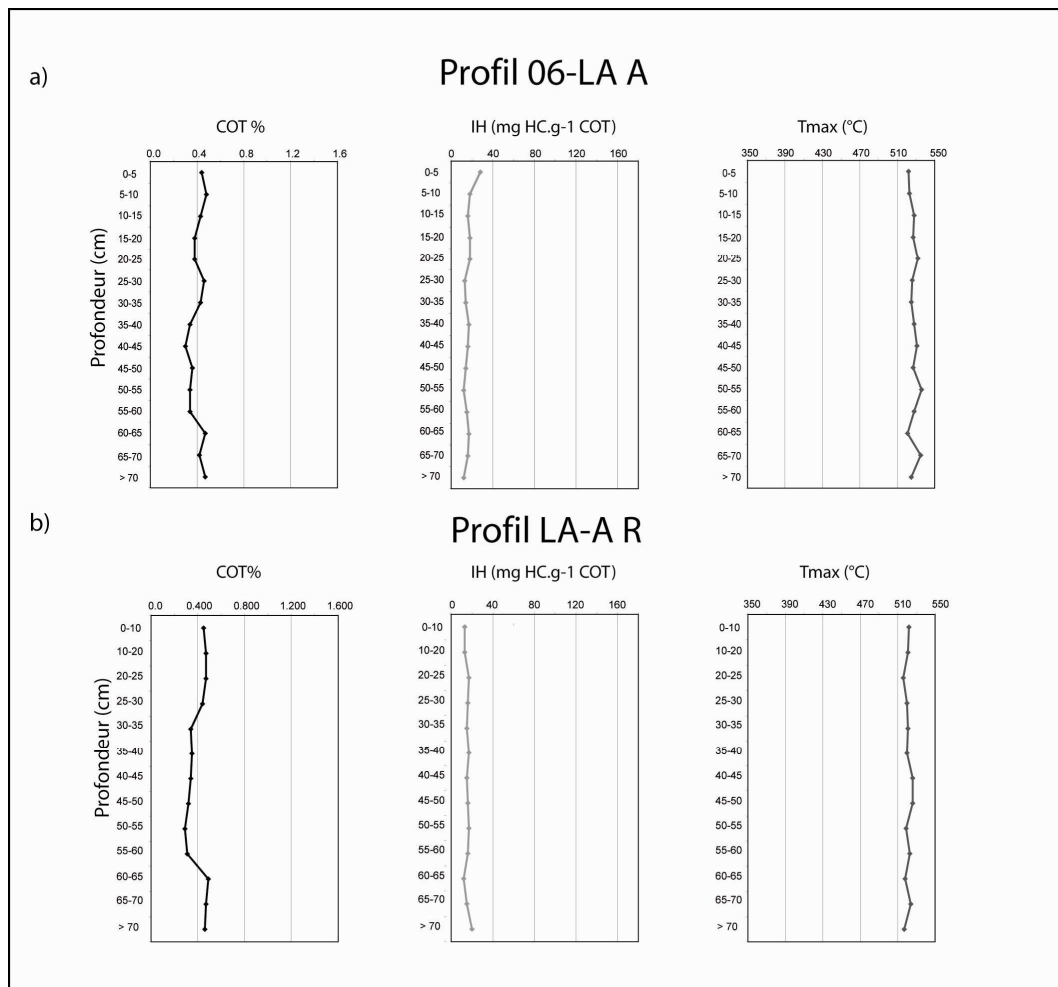


Figure III-36 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax le long des profils 06-LA A (a) et LA A R (b).

C-3-1-3) Profil 06-LA S2 (figure III-37)

- **06-LA S2, échantillons de sols** : Les échantillons OL, OH et A se caractérisent par des COT et IH importants (40,67 , 25,55 et 1,46 %, ainsi que 446, 309 et 164 mg HC.g⁻¹COT). Les Tmax sont par contre faibles et se limitent à 336, 330 et 410°C.
- **06-LA S2, échantillons PL** : Les échantillons semblent homogènes et présentent des valeurs de COT, IH et Tmax proches de celles mesurées dans les profils 06-La A et La A R. Seuls les échantillons prélevés entre 110 et 125 cm de profondeur se distinguent avec les plus fortes valeurs de COT et de Tmax (respectivement entre 0,62 et 0,69 % et entre 517 et 530°C).
- **06-LA S2, échantillons TF** : Les paramètres COT et IH de ces échantillons chutent progressivement avec la profondeur, respectivement de 1,13 à 0,45 % et de 128 à 11 mg HC.g⁻¹COT. Inversement, les valeurs de Tmax sont proches de 390°C jusqu'à 100 cm de profondeur, puis augmentent vers 520°C.

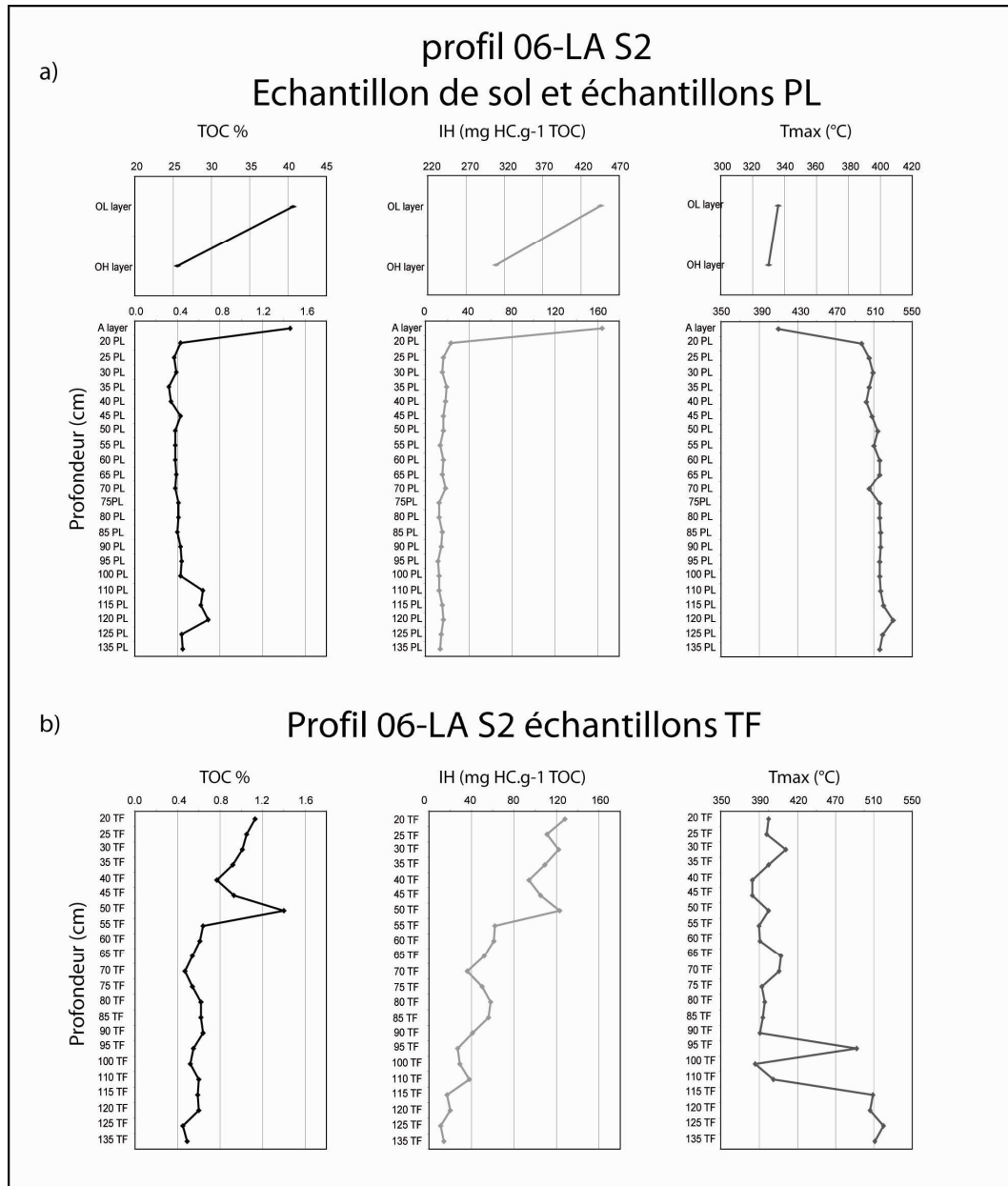


Figure III-37 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax le long du profil 06-LA S2
(a) échantillons de sols et plaquettes ; (b) échantillons de terres fines.

C-3-1-4) Particules fluviatiles (figure III-38)

Les échantillons de MES du Laval présentent des valeurs de COT et IH semblables, bien que très légèrement supérieures, à celles observées au sein des échantillons PL. Ainsi les COT évoluent entre 0,47 et 0,61 %, les IH entre 19 et 36 mg HC.g⁻¹COT et les Tmax entre 423 et 577°C. Les échantillons de CF présentent des valeurs comparables.

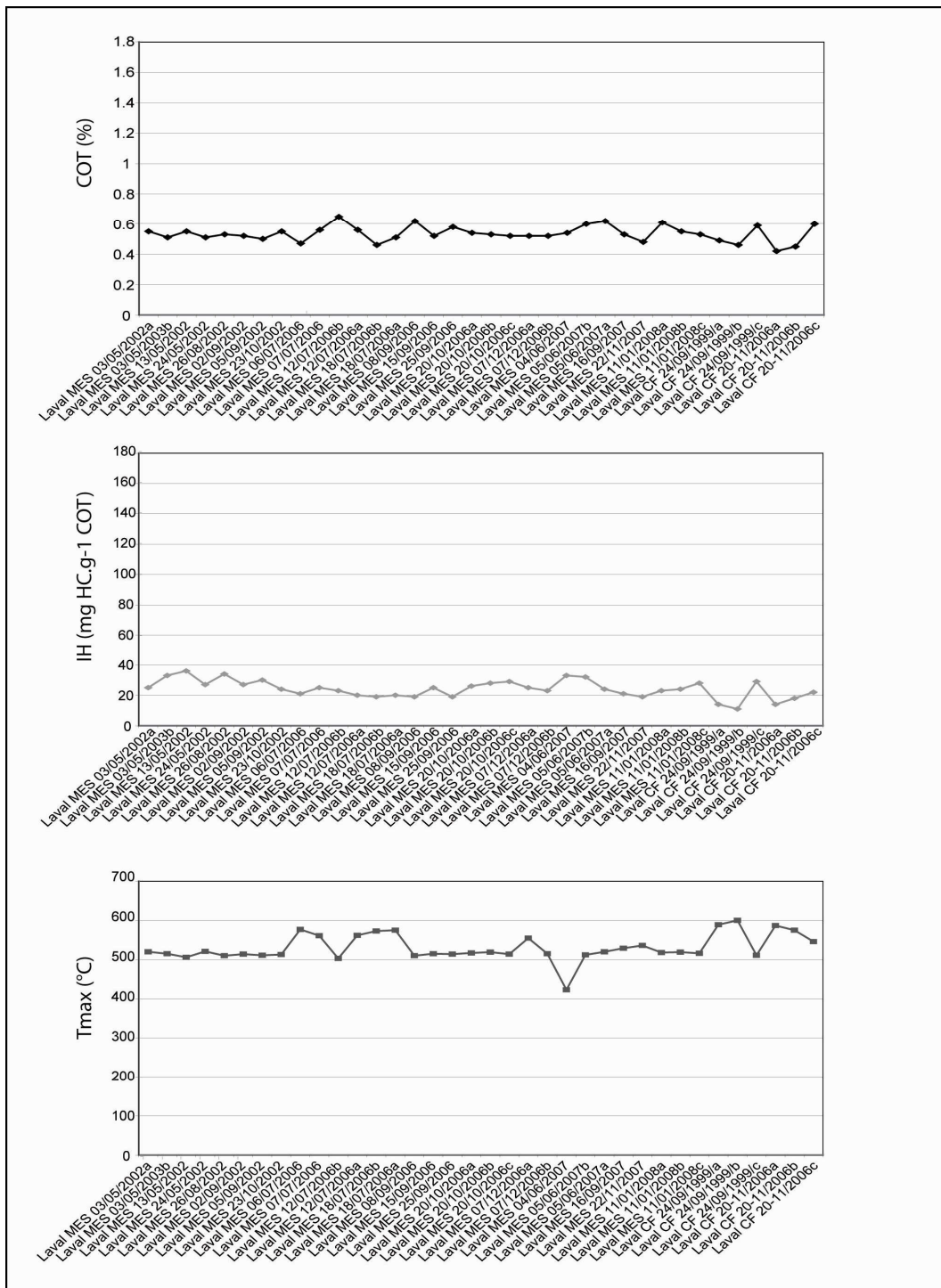


Figure III-38 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax dans les échantillons de particules fluviales du Laval.

C-3-1-5) Autres échantillons du bassin versant du Laval

Les échantillons de roches LAR2, LAR3, LAR4 et LAR5 (tableau III-3) possèdent une MO qualitativement et quantitativement proche de celle des échantillons PL des profils étudiés. Les COT varient entre 0,36 et 0,62 %, les IH entre 19 et 27 mg HC.g⁻¹COT, et les Tmax entre 495 et 578°C.

Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)
LAR2	0.45	500	27
LAR3	0.62	495	23
LAR4	0.57	573	19
LAR5	0.36	578	25

Tableau III-3 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax des échantillons LAR2, LAR3, LAR4 et LAR5.

C-3-2) Bassin versant du Brusquet

C-3-2-1) Profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat (figures III-39 et 40)

- **06-BRU S1, échantillons de sols (figure III-39) :** L'horizon OL possède de fortes valeurs de COT et d'IH, respectivement 43,66 et 466 mg HC.g⁻¹COT. Le Tmax est faible : 333°C. Les quatre échantillons d'horizons A (de 0 à 20 cm) se caractérisent par une forte décroissance des paramètres COT et IH avec la profondeur : ceux-ci chutant de 1,49 à 0,29 %, et de 145 à 10 de mg HC.g⁻¹COT. Inversement, les Tmax augmentent de 350 à 500°C.

- **06-BRU S1, échantillons PL (figure III-39) :** De 20 à 45 cm de profondeur les échantillons PL se caractérisent par des COT et IH faibles (de 0,21 à 0,32 % et de 8 à 17 mg HC.g⁻¹COT). Les Tmax sont proches de 500°C. Plus en profondeur, les échantillons PL se démarquent par des COT plus forts (de 0,7 à 0,84 %), des IH encore plus faibles (ne dépassant pas 7 mg HC.g⁻¹COT) et des Tmax très importants (de l'ordre de 605°C à l'exception de l'échantillon situé à 60 cm de profondeur, dont le Tmax se limite 491°C).

- **06-BRU S1, échantillons TF (figure III-39) :** Tout comme les échantillons PL, les TF se regroupent en deux compartiments distincts. Les échantillons prélevés entre 20 et 45 cm de profondeur se caractérisent par de faibles COT (de 0,42 à 0,52 %), tandis que ceux prélevés plus profondément possèdent des COT dépassant 0,7 %. De façon indépendante, les IH semblent décroître avec la profondeur, passant de 70 à 10 mg HC.g⁻¹COT. Les Tmax sont constants et proches de 390°C.

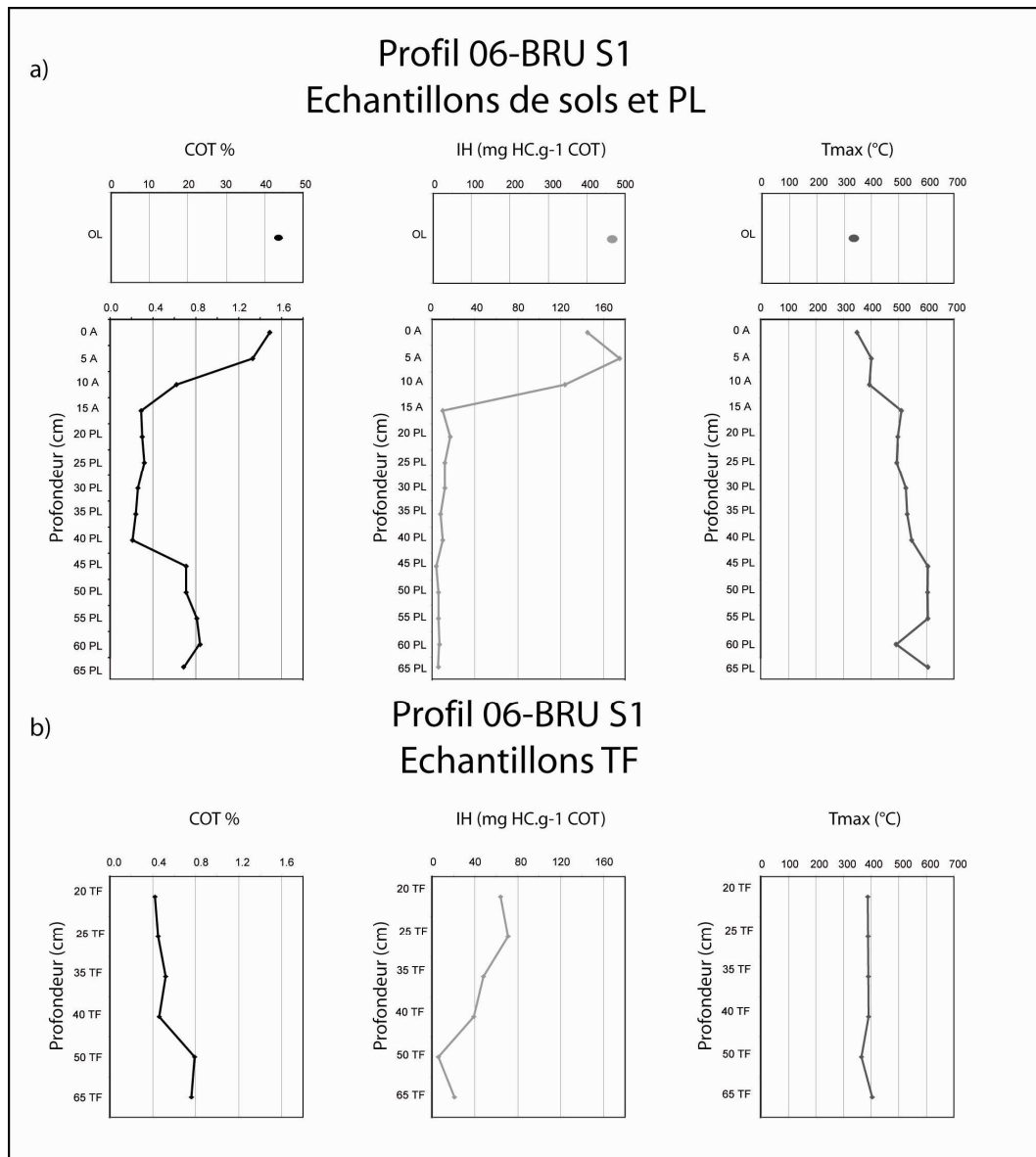


Figure III-39 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax le long du profil 06-BRU S1
a) échantillons de sol et de plaquettes (PL), b) échantillons de terres fines (TF).

- **BRU S1 Lat, échantillons PL (figure III-40)** : Les échantillons de ce profil sont très homogènes et semblables à ceux prélevés au fond du profil 06-BRU S1. Seul l'échantillon prélevé à la surface se distingue par un IH plus fort et un Tmax plus faible : respectivement 33 mg HC.g⁻¹COT et 392°C.

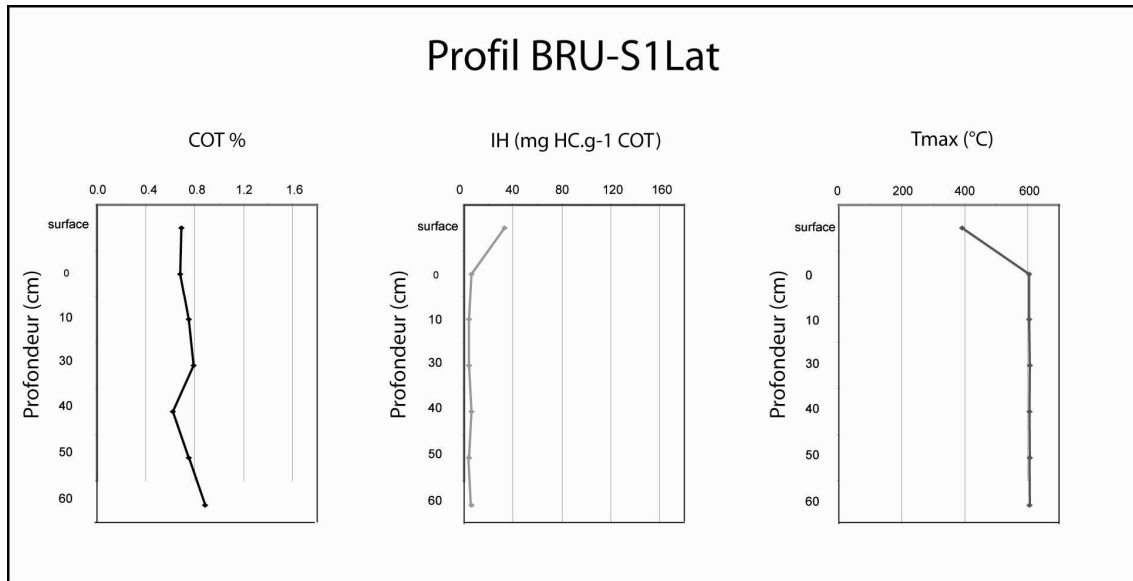


Figure III-40 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax le long du profil 0BRU S1 Lat.

C-3-2-2) Profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat (figures III-41 et 42)

- **06-BRU S3, échantillons PL (figure III-41)** : Ces échantillons sont homogènes et présentent des valeurs de COT et d'IH faibles. Elles évoluent respectivement entre 0,36 et 0,39 % et entre 11 et 18 mg HC.g⁻¹COT. Les Tmax sont de l'ordre de 510°C pour les 25 premiers cm, et augmentent ensuite vers des valeurs proches de 600°C.

.- **06-BRU S3, échantillons TF (figure III-41)** : Les COT et IH sont significativement plus importants : ces paramètres évoluent entre 0,97 et 1,69 %, ainsi qu'entre 137 à 224 mg HC.g⁻¹COT. Les Tmax sont par contre plus faibles et évoluent de 400 à 421 °C.

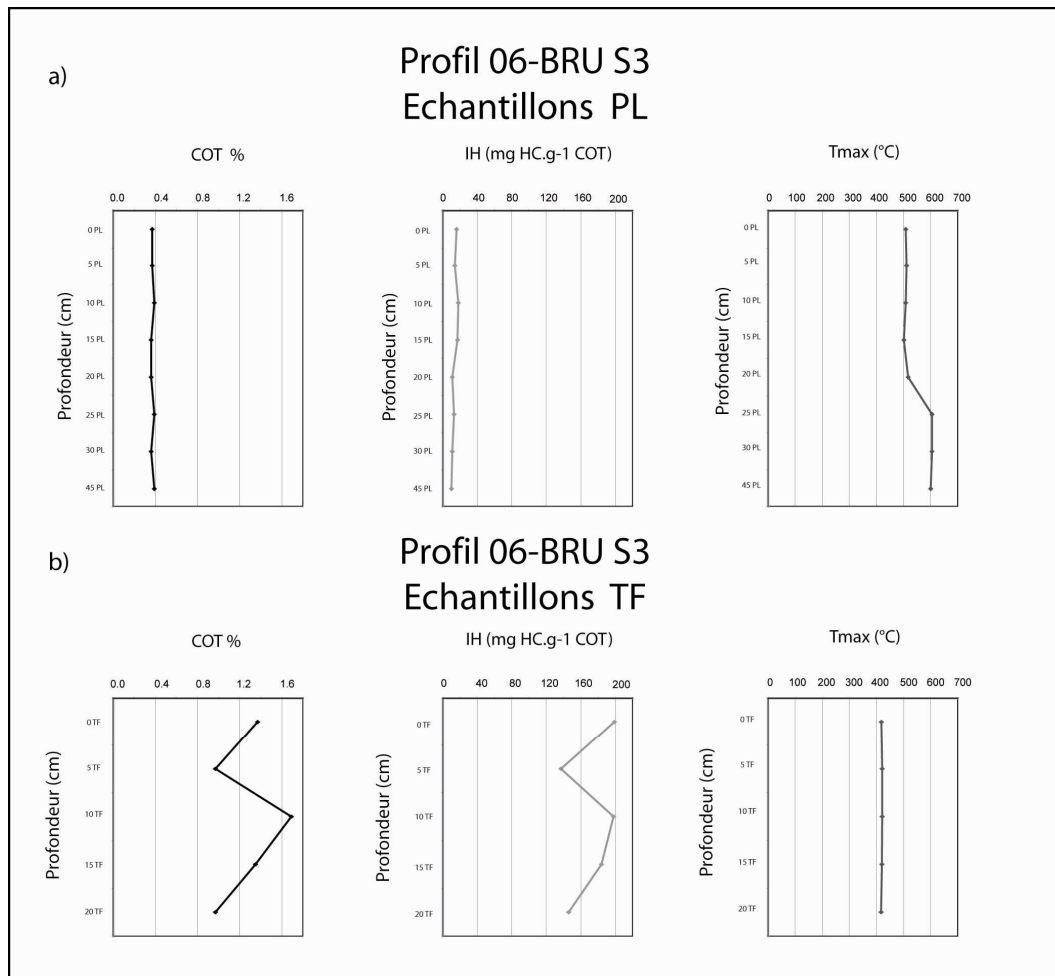


Figure III-41 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax le long du profil 06-BRU S3
a) échantillons de sol et de plaquettes (PL), b) échantillons de terres fines (TF).

- **BRU S3 Lat, échantillons de sols (figure III-42)** : Les échantillons OL, OF et OH se distinguent par de fortes valeurs de COT (27,73 , 14,3 et 16,2 %), et d'IH (491, 392, et 366 %). Les Tmax sont par contre faibles et proches de 330°C. Les deux échantillons d'horizon A, prélevés à 0 et 5 cm de profondeur présentent des valeurs plus faibles de COT (4,51 et 1,44 %), d'IH (364 et 217 mg HC.g⁻¹COT) et des Tmax plus importants (432 et 407°C).

- **BRU S3 Lat, échantillons PL (figure III-42)** : Ces échantillons sont similaires aux échantillons PL du profil 06-BRU S3 : les COT sont proches de 0,35 % et les IH de 15 mg HC.g⁻¹COT. Les Tmax sont plus variables et évoluent entre 374 et 605°C.

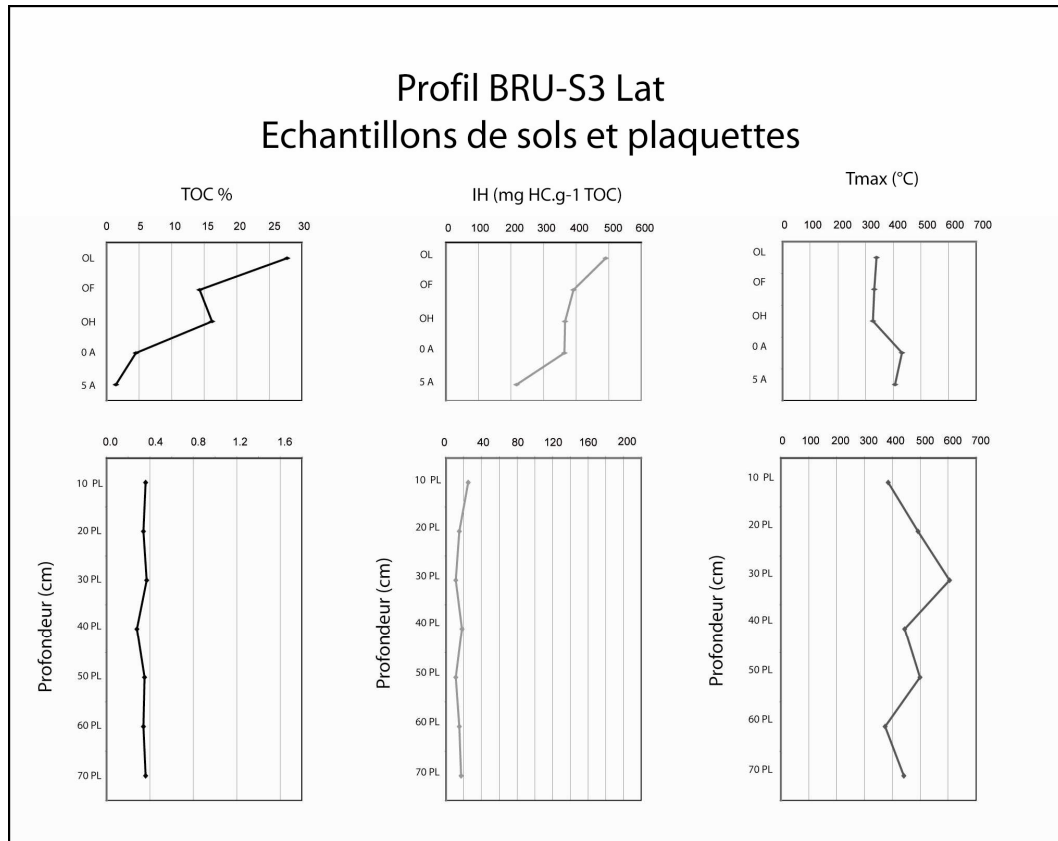


Figure III-42 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax le long du profil 0BRU S3 Lat.

C-3-2-3) Particules fluviales du bassin du Brusquet (figure III-43)

Les échantillons de MES présentent des valeurs de COT et d'IH relativement hétérogènes, bien que systématiquement supérieures à celles mesurées au sein des particules fluviales du Laval. Les COT évoluent entre 0,74 et 1,32 %, et les IH entre 50 et 378 mg HC.g⁻¹COT. Les Tmax sont par contre légèrement plus faibles et oscillent entre 381 et 405°C.

Les échantillons de CF diffèrent quelque peu : les COT varient entre 0,57 et 0,86 %, les IH entre 11 et 64 mg HC.g⁻¹COT, et les Tmax entre 348 et 413°C.

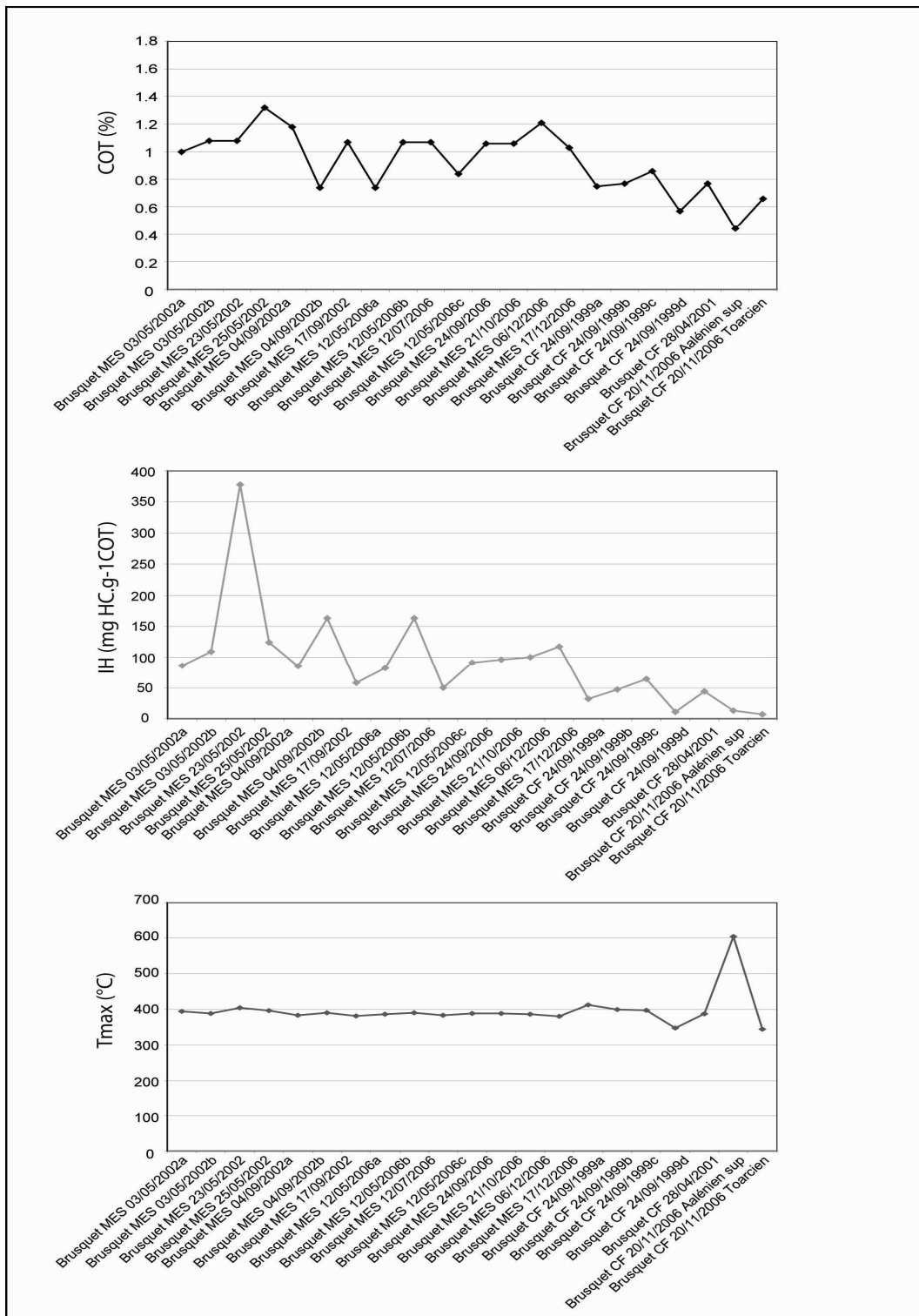


Figure III-43 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax des échantillons des particules fluviales du Brusquet.

C-3-2-4) Autres échantillons du bassin versant du Brusquet

Les échantillons de roches toarciennes B1, B2, B3, B4, B5 et B6 (tableau III-4) présentent des COT variant entre 0,52 et 0,79%, ainsi que des IH et Tmax faibles (de 6 à 21 mg HC.g⁻¹COT, et de 284 à 350°C).

Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)
B1	0.52	336	12
B2	0.76	335	8
B3	0.79	315	6
B4	0.74	352	7
B5	0.69	284	7
B6	0.57	350	21

Tableau III-4 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax des échantillons B1, B2, B3, B4, B5 et B6.

C-3-3) Bassin versant du Moulin

Les échantillons de MES et CF du bassin versant du Moulin présentent des valeurs de COT et d'IH proches de celles mesurées pour les particules fluviales du Laval. Les COT sont en effet proches de 0,55%, les IH de 30 mg HC.g⁻¹COT, et les Tmax de 400°C (figure III-44).

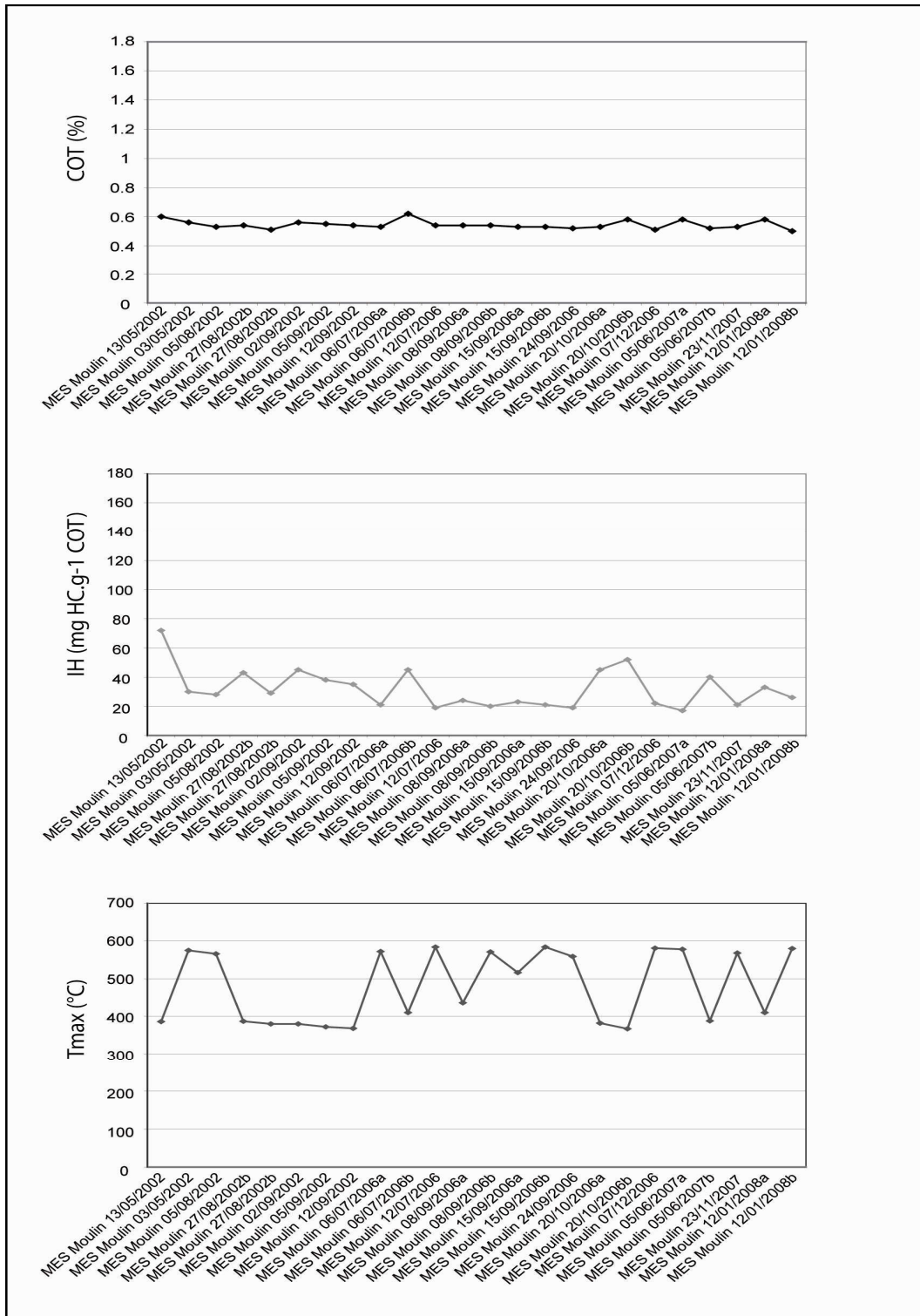


Figure III-44 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax des particules fluviales du Moulin.

C-4) Analyse ICP

L'ensemble des échantillons analysés est majoritairement constitué de SiO₂ (30 à 50 %), d'Al₂O₃ (10 à 18 %) et de CaO (12 à 29 %). La perte au feu représente aussi un % massique conséquent (14 à 30%) et les autres éléments sont en quantités plus négligeables (à l'exception de Fe₂O₃ pouvant atteindre 5 %).

C-4-1) Bassin versant du Laval

C-4-1-1) Profil A-LAV1 (tableau III-5)

Les teneurs en éléments sont relativement contrastées d'un échantillon à l'autre. Elles évoluent respectivement entre 34,3 et 40,7 % pour SiO₂, 13,1 et 15 % pour Al₂O₃, et 15,62 et 22,14 % pour CaO. La perte au feu représente de 17,9 à 22,9 % des échantillons et les teneurs moyennes en Fe₂O₃ sont de 5,3 %. Notons que les échantillons prélevés à 12 et 18 cm de profondeur présentent les plus fortes concentrations en SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ (respectivement jusqu'à 40,65 %, 14,95 et 5,99 %), ainsi que les plus faibles en CaO (15,69 % au maximum).

Echantillons	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Perte au feu %
A-LAV1 6 cm	36.95	0.61	13.40	5.12	0.22	1.09	18.84	0.37	2.24	<=0,1	22.88
A-LAV1 12 cm	40.32	0.69	14.95	5.99	0.25	1.06	15.69	0.45	2.42	0.27	17.9
A-LAV1 18 cm	40.65	0.68	14.85	5.85	0.24	1.20	15.62	0.40	2.41	0.11	18.45
A-LAV1 24 cm	37.82	0.64	14.01	5.58	0.22	1.13	17.90	0.41	2.29	0.11	19.4
A-LAV1 30 cm	37.48	0.63	13.96	5.28	0.21	1.16	18.45	0.41	2.33	0.11	20.32
A-LAV1 36 cm	36.90	0.63	13.69	5.12	0.20	1.16	19.46	0.40	2.33	0.11	20.24
A-LAV1 42 cm	35.26	0.60	13.19	4.98	0.19	1.13	19.96	0.39	2.25	0.10	21.04
A-LAV1 48 cm	34.42	0.59	13.00	4.91	0.25	1.11	20.30	0.39	2.15	0.11	21.41
A-LAV1 54 cm	34.68	0.60	13.11	4.82	0.21	1.13	21.25	0.40	2.19	0.10	21.29
A-LAV1 60 cm	34.28	0.59	13.06	5.11	0.16	0.92	22.14	0.39	2.13	0.21	21.12

Tableau III-5 : Teneurs en éléments majeurs et pertes au feu des échantillons du profil A-LA VI.

C-4-1-2) Profils 06-LA A et LA A R (tableau III-6)

- **06-LA A** : Les teneurs en SiO₂ et Al₂O₃ diminuent avec la profondeur, passant respectivement de 45 à 35 % et de 15,5 à 12,5 %. Inversement, nous observons une hausse des teneurs en CaO (de 13,5 à 20 %) et perte au feu (de 16,45 à 20,6 %). Les teneurs moyennes en Fe₂O₃ sont de 5,4 %.

- **LA A R** : Ces échantillons possèdent des teneurs similaires, mais nous n'observons pas les tendances précédemment évoquées. En effet, nous observons les teneurs minimum en SiO_2 et Al_2O_3 (34,6 et 12,4 %) et maximum en CaO (20,2 et 21 %) entre 50 et 65 cm de profondeur.

Echantillons	SiO_2 %	TiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	MnO %	MgO %	CaO %	Na_2O %	K_2O %	P_2O_5 %	Perte au feu %
06 LA A 0 cm	43.95	0.74	15.61	4.98	0.06	1.32	13.59	0.61	2.7	0.19	16.45
06 LA A 5 cm	44.67	0.75	15.7	6.02	0.06	1.35	13.44	0.64	2.81	0.29	16.18
06 LA A 10 cm	44.14	0.73	15.61	5.51	0.07	1.34	13.80	0.63	2.74	0.18	16.33
06 LA A 15 cm	45.67	0.77	15.32	5.23	0.06	1.33	13.32	0.64	2.7	0.18	16.56
06 LA A 20 cm	44.74	0.75	15.63	5.41	0.05	1.3	12.91	0.62	2.7	0.17	15.27
06 LA A 25 cm	44.73	0.74	15.72	6.06	0.07	1.35	13.72	0.64	2.79	0.24	15.32
06 LA A 30 cm	44.41	0.73	15.76	5.76	0.07	1.36	14.07	0.64	2.73	0.17	15.73
06 LA A 35 cm	40.38	0.66	14.17	5.61	0.07	1.32	16.48	0.59	2.46	0.15	17.75
06 LA A 40 cm	39.99	0.66	14.7	5.37	0.07	1.3	16.47	0.61	2.48	0.18	17.55
06 LA A 45 cm	40.97	0.67	15.33	5.16	0.07	1.3	15.16	0.6	2.52	0.15	17.15
06 LA A 50 cm	40.54	0.66	14.98	6.4	0.08	1.3	15.28	0.6	2.46	0.16	16.88
06 LA A 55 cm	38.29	0.62	13.9	5.69	0.08	1.3	17.36	0.59	2.26	0.16	18.35
06 LA A 60 cm	40.06	0.66	14.81	5.33	0.07	1.31	16.65	0.61	2.45	0.19	18.04
06 LA A 65 cm	37.35	0.61	12.93	4.3	0.09	1.22	19.61	0.55	2.16	0.21	19.94
06 LA A 70 cm	36.24	0.56	12.28	4.95	0.08	1.23	19.46	0.53	1.95	0.22	20.62
Echantillons	SiO_2 %	TiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	MnO %	MgO %	CaO %	Na_2O %	K_2O %	P_2O_5 %	Perte au feu %
LA A R 0 cm	45.71	0.79	16.55	5.18	0.05	1.38	12.24	0.43	2.44	0.06	15.38
LA A R 10 cm	43.82	0.74	16.53	5.58	0.06	1.37	12.79	0.41	2.48	0.05	15.80
LA A R 20 cm	44.07	0.74	16.79	5.61	0.06	1.38	13.11	0.44	2.51	0.04	15.98
LA A R 25 cm	44.71	0.78	16.79	5.41	0.05	1.35	12.22	0.43	2.52	0.01	15.53
LA A R 30 cm	43.56	0.75	16.43	5.14	0.06	1.35	12.76	0.42	2.44	0.00	16.17
LA A R 35 cm	43.54	0.75	16.60	5.19	0.06	1.34	13.17	0.43	2.46	0.01	15.85
LA A R 40 cm	41.71	0.71	15.77	5.26	0.06	1.32	14.36	0.41	2.43	0.02	17.92
LA A R 45 cm	38.80	0.65	14.39	5.43	0.07	1.27	16.21	0.38	2.18	0.02	18.33
LA A R 50 cm	37.04	0.59	13.31	5.48	0.09	1.33	19.21	0.38	2.03	0.02	20.24
LA A R 55 cm	34.63	0.56	12.35	4.97	0.09	1.28	20.17	0.35	1.86	0.02	21.00
LA A R 60 cm	35.62	0.57	12.63	5.14	0.09	1.25	19.50	0.37	1.93	0.08	20.50
LA A R 65 cm	43.33	0.74	16.29	5.21	0.06	1.36	13.53	0.44	2.52	0.05	15.65
LA A R 70 cm	42.46	0.71	15.55	4.48	0.05	1.33	12.63	0.42	2.41	0.15	15.54

Tableau III-6 : Teneurs en éléments majeurs et pertes au feu des échantillons des profils 06-LA A et LA A R.

C-4-1-3) Profil 06-LA S2 (tableau III-7)

- **06-LA S2, échantillon A** : Cet échantillon possède une teneur en CaO faible (11 %), et inversement, une perte au feu importante (19,5 %).

- **06-LA S2, échantillons PL** : Les teneurs mesurées sont relativement variables le long du profil, mais restent semblables à celles des profils 06-LA A et A LA R. Elles évoluent autour de 43,3 % pour SiO_2 , 15,9 % pour Al_2O_3 , 13,6 % pour CaO, 17% pour la perte au feu et 5,1 % pour Fe_2O_3 .

- **06-LA S2, échantillons TF** : La principale différence avec les échantillons PL réside dans une teneur en Al_2O_3 plus faible (14,6 %), et inversement, une teneur moyenne en CaO plus forte (14,2 %).

Echantillons	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Perte au feu %
06 La S2 A	42.44	0.70	16.31	5.56	0.07	1.25	10.96	0.48	2.59	0.17	19.52
06 LA S2 20 cm PL	42.53	0.69	16.53	5.43	0.05	1.31	12.26	0.46	2.56	0.13	17.28
06 LA S2 25 cm PL	43.71	0.70	16.72	5.06	0.05	1.31	11.63	0.50	2.65	0.08	16.68
06 LA S2 30 cm PL	45.69	0.74	17.41	5.41	0.05	1.56	11.18	0.52	2.73	<=0,1	16.64
06 LA S2 35 cm PL	43.69	0.70	16.65	5.42	0.05	1.28	12.76	0.51	2.66	<=0,1	17.08
06 LA S2 40 cm PL	40.62	0.62	14.18	5.63	0.08	1.39	16.78	0.51	2.27	<=0,1	19.3
06 LA S2 45 cm PL	41.32	0.66	14.73	4.73	0.06	1.32	15.14	0.53	2.40	<=0,1	18.82
06 LA S2 50 cm PL	42.67	0.69	15.90	4.96	0.05	1.23	13.34	0.51	2.66	<=0,1	17.38
06 LA S2 55 cm PL	40.82	0.64	14.92	4.93	0.07	1.17	16.22	0.48	2.46	0.11	19.58
06 LA S2 60 cm PL	43.47	0.70	16.13	5.13	0.07	1.22	13.39	0.53	2.68	0.33	16.92
06 LA S2 65 cm PL	43.26	0.69	15.94	5.43	0.06	1.41	13.41	0.52	2.65	<=0,1	17.44
06 LA S2 70 cm PL	43.87	0.71	16.29	5.06	0.06	1.44	12.98	0.54	2.75	<=0,1	16.6
06 La S2 75 cm PL	44.49	0.72	16.44	4.74	0.05	1.48	12.22	0.57	2.80	<=0,1	16.38
06 La S2 80 cm PL	44.27	0.74	16.82	5.15	0.05	1.53	11.91	0.56	2.86	<=0,1	16.74
06 LA S2 85 cm PL	43.35	0.72	16.49	5.25	0.06	1.53	12.62	0.54	2.74	<=0,1	16.8
06 La S2 90 cm PL	37.03	0.62	14.00	3.85	0.07	1.05	20.01	0.46	2.23	<=0,1	20.84
06 LA S2 95 cm PL	45.43	0.76	15.82	5.05	0.05	1.14	13.59	0.53	2.71	0.16	14.77
06 LA S2 100 cm PL	43.41	0.72	14.51	4.38	0.06	1.25	16.18	0.55	2.52	<=0,1	16.46
06 La S2 110 cm PL	47.30	0.82	16.50	5.35	0.05	1.24	11.87	0.58	2.80	0.19	14.21
06 LA S2 115 cm PL	45.85	0.79	16.70	4.99	0.04	1.26	12.72	0.56	2.73	0.13	14.57
06 La S2 120cm PL	47.26	0.83	17.52	5.69	0.04	1.49	10.42	0.60	3.03	<=0,1	13.54
06 LA S2 125 cm PL	43.40	0.75	15.72	5.14	0.06	1.39	14.15	0.56	2.68	<=0,1	16.41
06 LA S2 135 cm PL	40.19	0.67	13.75	4.75	0.05	1.29	16.79	0.83	2.54	<=0,1	18.36
Echantillons	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Perte au feu %
06 LA S2 20 cm TF	42.17	0.69	14.81	5.38	0.05	1.04	12.79	0.46	2.5	0.12	16.99
06 LA S2 25 cm TF	43.40	0.71	15.11	5.23	0.05	1.08	12.59	0.47	2.52	0.06	16.44
06 LA S2 30 cm TF	42.73	0.7	15.39	5.97	0.06	1.08	13.11	0.45	2.43	0.04	16.66
06 LA S2 35 cm TF	43.81	0.71	15.77	5.40	0.06	1.13	12.80	0.48	2.54	0.06	17.23
06 LA S2 40 cm TF	41.45	0.65	14.24	5.94	0.06	1.09	15.96	0.43	2.21	0.1	17.92
06 LA S2 45 cm TF	39.10	0.6	13.09	5.41	0.07	1.07	16.80	0.42	2.07	0.14	20.18
06 LA S2 50 cm TF	40.22	0.62	13.06	5.38	0.07	1.03	17.49	0.43	2.08	0.07	20.1
06 LA S2 55 cm TF	42.26	0.66	14.04	5.54	0.07	1.08	16.06	0.45	2.26	0.07	18.83
06 LA S2 60 cm TF	42.74	0.65	13.91	5.68	0.07	1.08	16.22	0.44	2.22	0.06	18.77
06 LA S2 65 cm TF	39.73	0.61	13.43	4.30	0.07	1.07	14.37	0.39	2.1	0.03	18.31
06 LA S2 70 cm TF	42.01	0.64	13.90	5.71	0.08	1.07	15.65	0.45	2.32	0.08	18.81
06 LA S2 75 cm TF	40.77	0.65	14.63	5.84	0.07	1.19	13.75	0.44	2.32	0.08	17.25
06 LA S2 80 cm TF	40.74	0.68	14.94	5.70	0.06	1.20	14.15	0.44	2.28	0.04	18.7
06 LA S2 85 cm TF	43.32	0.7	14.91	5.22	0.06	1.13	14.18	0.47	2.32	0.06	16.92
06 LA S2 90 cm TF	45.04	0.75	15.42	4.96	0.06	1.20	13.03	0.51	2.44	0.06	16.66
06 LA S2 95 cm TF	43.83	0.74	15.07	5.13	0.07	1.19	13.54	0.48	2.4	0.06	16.63
06 LA S2 100 cm TF	43.63	0.73	14.74	5.41	0.07	1.15	13.95	0.49	2.34	0.03	17.29
06 LA S2 110 cm TF	43.76	0.71	14.70	6.10	0.10	1.17	13.23	0.46	2.36	0.02	16.93
06 LA S2 115 cm TF	44.65	0.76	15.66	5.42	0.12	1.24	11.89	0.49	2.49	0.01	15.76
06 LA S2 120cm TF	46.08	0.79	16.20	5.74	0.1	1.29	11.64	0.52	2.66	0.06	15.18
06 LA S2 125 cm TF	41.86	0.69	14.65	5.77	0.07	1.23	14.56	0.45	2.34	0.01	17.31
06 LA S2 135 cm TF	39.77	0.65	13.92	5.35	0.06	1.17	15.80	0.47	2.23	0.07	18.28

Tableau III-7: Teneurs en éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons du profil 06-LA S2.

C-4-1-4) Particules fluviales (tableau III-8)

Les teneurs moyennes sont proches de celles précédemment présentées : 39,4 % pour SiO₂, 14,9 % pour Al₂O₃, 16,5 % pour CaO, 18 % pour la perte au feu et 5,4 % pour Fe₂O₃.

Echantillons	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Perte au feu %
Laval MES 12/07/2006a	40.20	0.73	16.21	5.27	0.10	1.77	16.13	0.47	2.67	0.12	17.52
Laval MES 08/09/2006	38.36	0.70	15.16	5.08	0.09	1.68	16.11	0.48	2.58	0.12	18.68
Laval MES 25/09/2006	38.98	0.70	14.84	5.31	0.09	1.77	16.34	0.49	2.44	0.13	17.90
Laval MES 20/10/2006	39.98	0.73	15.38	5.32	0.09	1.79	15.71	0.48	2.56	0.13	17.51
Laval MES 07/12/2006a	39.17	0.69	14.17	5.59	0.10	1.77	17.48	0.49	2.32	0.12	18.10
Laval MES 05/06/2007a	40.56	0.72	14.62	5.85	0.10	1.69	16.30	0.50	2.38	0.10	17.12
Laval MES 22/11/2007	37.75	0.65	13.57	5.34	0.10	1.91	18.04	0.50	2.20	0.11	18.87
Laval MES 11/01/2008	40.04	0.70	14.64	5.51	0.10	1.78	16.21	0.49	2.36	0.12	18.12

Tableau III-8 Teneurs en éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons de MES du Laval.

C-4-2) Bassin versant du Brusquet

C4-2-1) Profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat (tableau III-9)

- **06-BRU S1, échantillons A** : Les teneurs moyennes sont de 42 % pour SiO₂, 12,1% pour Al₂O₃, 17 % pour CaO, 19,1 % pour la perte au feu et 4,2 % pour Fe₂O₃.

- **06-BRU S1, échantillons PL** : Ces échantillons se distinguent en deux ensembles. De 20 à 45 cm, les teneurs moyennes sont 43,7 % pour SiO₂, 12,3 % pour Al₂O₃, 17 % pour CaO, 17,5 % pour la perte au feu et 4,2 % pour Fe₂O₃. Les échantillons plus profonds se caractérisent par des teneurs moyennes plus importantes en SiO₂ et Al₂O₃ (48,9 et 14 %) et plus faibles en CaO et perte au feu (12,5 et 15 %).

- **06-BRU S1, échantillons TF** : Les teneurs moyennes sont de 46 % pour SiO₂, 13,9 % pour Al₂O₃, 13,7 % pour CaO, 16,2 % pour la perte au feu et 4,1 % pour Fe₂O₃.

- **BRU S1 Lat** : Les teneurs moyennes sont 44,9 % pour SiO₂, 13,3 % pour Al₂O₃, 15,7 % pour la perte au feu et 3,8 % pour Fe₂O₃. Seules les teneurs en CaO présentent une évolution et augmentent de la surface vers le fond de la lamine, passant de 13,9 à 16,2 %.

Echantillons	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Perte au feu %
06 BRU S1 A 0 cm	40.50	0.60	11.61	3.94	0.06	1.24	17.23	0.39	1.79	0.11	20.43
06 BRU S1 A 5 cm	41.74	0.62	11.93	4.15	0.06	1.26	17.12	0.38	1.85	0.10	20.01
06 BRU S1 A 10 cm	40.67	0.61	11.75	4.09	0.06	1.27	18.55	0.38	1.83	0.12	19.70
06 BRU S1 A 15 cm	44.89	0.68	13.05	4.49	0.06	1.35	15.80	0.44	2.01	0.14	16.19
06 BRU S1 PL 20 cm	45.80	0.69	13.35	4.37	0.06	1.40	14.10	0.46	2.06	0.09	15.98
06 BRU S1 PL 25 cm	45.00	0.69	13.18	4.19	0.05	1.35	15.37	0.44	2.05	0.14	16.56
06 BRU S1 PL 30 cm	42.54	0.61	11.90	3.96	0.06	1.27	17.73	0.39	1.78	0.09	18.24
06 BRU S1 PL 35 cm	39.11	0.54	10.57	4.09	0.06	1.19	20.63	0.35	1.61	0.07	20.30
06 BRU S1 PL 40 cm	45.84	0.64	12.65	4.46	0.06	1.33	15.06	0.44	1.91	0.10	16.30
06 BRU S1 PL 45 cm	49.50	0.73	14.04	4.27	0.04	1.87	11.92	0.45	2.07	0.10	14.74
06 BRU S1 PL 50 cm	49.60	0.72	14.04	3.98	0.04	1.89	11.76	0.47	2.07	0.12	14.34
06 BRU S1 PL 55 cm	48.33	0.73	14.09	3.88	0.04	1.97	12.24	0.45	2.13	0.12	14.65
06 BRU S1 PL 60 cm	48.16	0.71	14.01	4.31	0.04	1.92	13.99	0.45	2.10	0.12	16.01
06 BRU S1 PL 65 cm	45.25	0.70	13.39	3.77	0.05	1.75	14.64	0.43	2.00	0.09	16.65
Echantillons	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Perte au feu %
06 BRU S1 TF 20 cm	47.09	0.72	13.77	3.92	0.06	1.46	13.96	0.43	2.04	0.12	16.15
06 BRU S1 TF 25 cm	46.79	0.72	14.07	3.86	0.06	1.46	13.69	0.43	2.08	0.10	16.44
06 BRU S1 TF 35 cm	45.48	0.71	13.61	3.84	0.05	1.46	13.96	0.41	2.01	0.13	16.52
06 BRU S1 TF 40 cm	46.94	0.73	14.32	4.26	0.06	1.49	13.07	0.43	2.06	0.13	16.03
06 BRU S1 TF 50 cm	46.55	0.72	14.03	4.80	0.05	1.78	12.24	0.44	2.06	0.10	14.57
06 BRU S1 TF 65 cm	43.27	0.68	13.35	4.03	0.05	1.64	14.98	0.40	1.97	0.13	17.55
Echantillons	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Perte au feu %
BRU S1 Lat surface	44.77	0.71	13.49	3.68	0.04	1.58	13.88	0.51	2.11	0.13	15.86
BRU S1 Lat	46.07	0.72	13.74	3.73	0.04	1.95	14.71	0.44	1.86	0.13	16.09
BRU S1 Lat	43.98	0.67	13.00	4.00	0.04	1.93	14.69	0.45	1.88	0.08	16.08
BRU S1 Lat	45.32	0.70	13.27	3.78	0.04	1.53	14.64	0.47	1.92	0.08	15.75
BRU S1 Lat	44.76	0.68	13.24	3.90	0.04	1.83	15.38	0.50	1.96	0.20	16.36
BRU S1 Lat	44.48	0.70	13.47	4.10	0.04	1.82	14.96	0.48	2.09	0.15	16.08
BRU S1 Lat	44.73	0.69	12.91	3.54	0.04	1.55	16.22	0.49	2.09	0.14	13.32

Tableau III-9 : Teneurs en éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons des profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat.

C-4-2-2) Profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat (tableau III-10)

- **06-BRU S3, échantillons PL** : Ces échantillons sont homogènes et généralement plus carbonatés que ceux des précédents profils. Ils contiennent en moyenne 33,1 % de SiO₂, 11,5 % d'Al₂O₃, 23,7 % de CaO, 22,3 % de perte au feu et 4,5 % de Fe₂O₃.
- **06-BRU S3, échantillons TF** : A l'exception des teneurs en CaO (21,5 % en moyenne), les teneurs mesurées pour ces échantillons sont proches de celles mesurées pour les échantillons PL.
- **BRU S3 Lat, échantillons A** : Les deux échantillons d'horizon A, prélevés à 0 et 5 cm de profondeur, possèdent des teneurs faibles en CaO (22 et 23,6 %), et fortes en pertes au feu (30 et 23,9 %).
- **BRU S3 Lat, échantillons PL** : Les teneurs moyennes sont 31,3 % pour SiO₂, 10,8 % pour Al₂O₃, 27,7 % pour CaO, 22,6 % pour la perte au feu et 3,5 % pour Fe₂O₃.

Echantillons	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Perte au feu %
06 BRU S3 PL 0 cm	33.7	0.54	11.9	4.79	0.17	1.77	23.78	0.52	1.99	0.04	21.44
06 BRU S3 PL 5 cm	33.96	0.54	11.81	4.86	0.18	1.84	23.7	0.53	1.99	0.05	21.27
06 BRU S3 PL 10 cm	33.11	0.53	11.6	4.81	0.18	1.73	22.69	0.54	2.01	0.06	21.34
06 BRU S3 PL 15 cm	32.88	0.54	11.18	4.51	0.18	1.9	24.29	0.58	1.95	0.05	22.61
06 BRU S3 PL 20 cm	32.49	0.51	11.29	4.31	0.18	1.8	24.43	0.52	1.95	0.06	22.16
06 BRU S3 PL 25 cm	33.68	0.53	11.66	4.71	0.19	1.85	24.39	0.51	2.02	0.08	22.24
06 BRU S3 PL 30 cm	32.6	0.52	11.52	3.86	0.17	1.66	23.34	0.47	1.99	0.05	24.72
06 BRU S3 PL 45 cm	32.69	0.49	11.38	4.02	0.17	1.7	23.19	0.5	1.9	0.05	22.65
Echantillons	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Perte au feu %
06 BRU S3 TF 0 cm	33.08	0.53	11.84	5.07	0.17	1.68	21.32	0.48	2	0.1	21.78
06 BRU S3 TF 5 cm	34.19	0.52	12.2	4.75	0.19	1.73	22.23	0.46	1.99	0.11	22.27
06 BRU S3 TF 10 cm	33.63	0.53	12.62	4.55	0.18	1.87	20.52	0.52	2.16	0.07	22.75
06 BRU S3 TF 15 cm	32.7	0.5	11.88	4.73	0.2	1.86	21.17	0.48	1.97	0.04	23.49
06 BRU S3 TF 20 cm	33.31	0.5	12	4.51	0.2	1.87	22.1	0.52	2.08	0.05	22.81
Echantillons	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Perte au feu %
BRU S3 Lat A 0 cm	29.31	0.47	10.34	4.04	0.17	1.43	22	0.48	1.88	0.06	29.99
BRU S3 Lat A 5 cm	32.5	0.52	11.63	4.5	0.19	1.52	23.57	0.52	2.08	0.06	23.85
BRU S3 Lat PL 10 cm	30.67	0.48	10.46	3.53	0.18	1.58	27.67	0.5	1.7	0.06	23.08
BRU S3 Lat PL 20 cm	31.28	0.49	10.85	3.36	0.19	1.67	27.98	0.54	1.88	0.05	22.85
BRU S3 Lat PL 30 cm	31.06	0.5	10.81	3.71	0.18	1.73	27.19	0.51	1.78	0.05	21.94
BRU S3 Lat PL 40 cm	32.14	0.5	10.96	4.02	0.17	1.72	26.82	0.49	1.89	0.04	22.24
BRU S3 Lat PL 50 cm	31.14	0.5	10.83	2.72	0.18	1.74	27.21	0.47	1.86	0.04	22.37
BRU S3 Lat PL 60 cm	31.74	0.5	10.92	3.42	0.18	1.79	28.63	0.48	1.85	0.04	22.82
BRU S3 Lat PL 700 cm	31.13	0.49	10.88	3.36	0.16	1.75	26.85	0.49	1.84	0.05	22.27

Tableau III-10 : Teneurs en éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat.

C-4-2-3) Particules fluviatiles (tableau III-11)

Les teneurs moyennes des deux échantillons de MES sont 37,4 % pour SiO₂, 13,6 % pour Al₂O₃, 18,2 % pour CaO, 20,5 % pour la perte au feu et 4,5 % pour Fe₂O₃.

Echantillons	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Perte au feu %
Brusquet MES 12/07/2006a	38.72	0.65	13.74	4.79	0.11	1.86	18.37	0.52	2.32	0.12	19.37
Brusquet MES 24/09/2006	36.00	0.62	13.48	4.24	0.05	2.43	17.97	0.54	2.28	0.13	21.60

Tableau III-11 : Teneurs en éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons de MES du Brusquet.

C-4-3) Bassin versant du Moulin

Les teneurs moyennes des échantillons de MES du Moulin atteignent 34,1 % pour SiO₂, 13,5 % pour Al₂O₃, 20,6 % pour CaO, 20,8 % pour la perte au feu et 5,3 % pour Fe₂O₃ (tableau III-12).

Echantillons	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	Perte au feu %
Moulin MES 08/09/2006a	34.56	0.62	14.18	4.92	0.16	1.55	19.59	0.45	2.38	0.13	20.24
Moulin MES 24/09/2006	33.88	0.56	12.83	5.52	0.17	1.65	22.01	0.44	2.04	0.11	21.38
Moulin MES 20/10/2006a	33.35	0.56	12.88	5.72	0.17	1.70	21.58	0.45	2.04	0.11	21.21
Moulin MES 07/12/2006	34.24	0.59	13.66	5.45	0.16	1.69	19.75	0.43	2.28	0.13	20.48
Moulin MES 05/06/2007a	34.20	0.60	13.65	5.40	0.17	1.62	20.92	0.42	2.20	0.11	20.83
Moulin MES 23/11/2007	34.68	0.61	13.47	4.98	0.15	1.81	20.78	0.47	2.22	0.11	20.96
Moulin MES 12/01/2008a	34.03	0.59	13.74	5.03	0.15	2.04	19.87	0.53	2.30	0.11	20.54

Tableau III-12 : Teneurs en éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons de MES du Moulin.

D) Bilan

D-1) Définition de MOR et MOF et pertinence des analyses

Les analyses conduites permettent de caractériser les différentes MO présentes au sein de nos échantillons. La MOF sera définie comme étant celle contenue dans les roches et la MOR celle contenue dans les litières et horizons humiques.

D-1-1) Analyses optiques

D-1-1-1) La MOR

- Palynofacies :

La MO contenue dans les horizons de sols OL, OF et OH étudiés est majoritairement constituée de débris ligno-cellulosiques divers, d'AG, d'éléments figurés et de MOAgc. Nous observons en général une baisse des particules de type LC au profit des AG des horizons OL vers les horizons OH (profils 06-LA S2, BRU S3 Lat). Ce phénomène peut traduire une perte massique différentielle entre les différentes particules, notamment LC et AG, ou le fait que les AG pourraient être le produit de la dégradation pédologique des autres particules. Ce phénomène a déjà été observé dans d'autres sols français (Lallier-Verges *et al*, 1993 ; Sebag *et al*, 2006).

- Mesure du pouvoir réflecteur

Certaines de ces particules présentent une légère réflectance (R0%), de l'ordre de 0,3%, ce qui est légèrement supérieur aux valeurs attendues pour une MO immature (<0,2 %, Alpern dans Kerogen, 1980).

D-1-1-1) La MOF

- Palynofacies :

La MO contenue dans les échantillons de roches est constituée de LCO, MOAr et débris gélifiés (DG et DGO). Seule la MO de quelques échantillons prélevés sur roche toarcienne (fond du profil 06-BRU S1 et profil BRU S1 Lat) contient des particules de MOAO et des pollens.

- Les débris gélifiés (DG et DGO) sont typiques des particules de vitrinites³² décrites dans la bibliographie (Combaz in Durand, 1980 ; Tyson, 1995). Ces particules sont interprétées comme le résultat de la diagénèse puis de la maturation thermique de matériel organique terrestre (ligno-cellulosique) dans un contexte d'enfouissement.

- Les LCO observés au sein des différentes roches étudiés sont de formes variées. Ces particules sont semblables à celles observées par Di-Giovanni *et al* (1997, 1998, 1999c, 2000a) dans les roches sédimentaires du bassin de Chaillexon, du bassin des Peyssiers (1999a,b), ainsi que du bassin du Moulin (2000). Ce type de particules peut être interprété, à l'instar de débris gélifiés, comme des vitrinites, ou alors comme le produit d'une combustion (inertinite, Combaz in Durand, 1980 ; Tyson, 1995). En effet, la morphologie complexe de certains LCO, associée à présence de vacuoles (notamment dans les échantillons les plus profonds de roche toarcienne), est typique de telles particules, parfois appelées pyrofusinites (Tyson, 1995 ; Vannière, 2001 ; Daniau, 2008).

- L'origine des MOAr est plus complexe. En effet la nature et l'origine des particules organiques amorphes contenue dans les roches sédimentaires sont encore très discutées (Combaz dans Kerogen, 1980 ; Tissot et Welte, 1984 ; Tyson, 1992 ; Boussafir, 1994 ; 1997 ; Riboulleau *et al*, 2000). La définition la plus proche de la MOAr observée dans nos échantillons semble être la « matière organique grumeleuse » décrite par Combaz (in Durand, 1980). Son origine peut être diverse (marine, lacustre ou continentale).

- La MOAO est observée dans les échantillons de roche toarcienne. Toujours selon Combaz (1980), cette MO peut être interprétée comme « matière organique grumeleuse ». Sa couleur sombre et sa densité seraient par contre dues à une maturation thermique plus poussée.

³² La vitrinite est le principal constituant des charbons. Il est parfois possible de distinguer la structure originelle du précurseur.

- Les pollens observés dans la roche toarcienne (fond du profil 06-BRU S1) confirment l'origine continentale (au moins partielle) de la MO.

- Mesure du pouvoir réflecteur

La mesure du pouvoir réflecteur des particules organiques présentes dans les roches (R0 majoritairement de 1 à 3%) atteste de maturité de ces dernières. L'évolution de cette MO aurait en effet atteint le stade de la catagenèse avancée, voire de la métagenèse³³ (Alpern, Robert, Pelet in Durand, 1980 ; Tissot et Welte, 1984 ; Tyson, 1995). L'échantillon de roche toarcienne le plus profond possède une grande quantité de particules aux très forts pouvoirs réflecteurs (R0 majoritairement de 3 à 5%), confirmant la présence d'inertinite dans cet échantillon.

Plus globalement, la forte dispersion des R0 (%) semble attester de la diversité des origines de la MO contenue dans chaque échantillon de roches et pourrait traduire la présence de matériel remanié (Robert in Durand, 1980). De tels phénomènes ont déjà été observés, notamment au sein de roches mères pétrolières (Ramanampisoa et Disnar, 1994).

³³ Au cours de son enfouissement, la MO évolue et se dégrade progressivement sous l'influence de l'élévation de température. La première étape appelée diagenèse consiste en une perte des composées oxygénés sous forme de CO₂ et d'H₂O. L'étape suivante, la catagenèse, consiste à la formation d'huile, puis d'hydrocarbures plus légers. La métagenèse correspond à l'étape la plus avancée de l'évolution et à la formation de méthane par craquage des hydrocarbures précédemment formés et de la MO insoluble restante (Pelet dans Durand, 1980).

D-1-2) Pyrolyse Rock-Eval

La distinction entre MOF et MOR peut être tentée en représentant les paramètres Rock-Eval dans des diagrammes IH / IO, IH / Tmax et IH / TOC (figure III-45). Ces derniers permettant à la fois de visualiser le type de matière organique et d'apprécier son degré de maturité³⁴.

La MOR est d'une façon générale caractérisée par de forts IH et COT, et par de faibles Tmax. Nous notons que la transition des horizons OL vers les horizons OF et OH se traduit par une chute systématique des COT (de 40 à 20 % en moyenne) et des IH (de 500 à 300 mg HC.g⁻¹COT en moyenne). Cette évolution est caractéristique de la dégradation pédologique de la MO (Disnar *et al*, 2003). Les Tmax sont généralement proches de 330°C, témoignant de l'immaturité de cette MO (Espitalié *et al*, 1977, 1985). Les IO (annexes 22 à 28) évoluent entre 94 et 196 mg de CO₂.g⁻¹ COT.

La MOF est d'une façon générale caractérisée par de faibles COT évoluant entre 0,11% pour le calcaire du Bajocien à 0,8% au maximum pour certains niveaux de marnes du Toarcien. Ces mesures sont cohérentes avec celle proposées par Artru (1972) pour l'ensemble des terres noires du Sud Est de la France. Cependant, ces faibles TOC nous incitent à relativiser les valeurs obtenues pour les autres paramètres³⁵. Notons simplement des IH faibles (souvent inférieurs à 20, voire 10 mg HC.g⁻¹COT) ainsi qu'une très forte dispersion des Tmax (de 284 à plus de 600°C) et des IO (de 21 à 165 mg de CO₂.g⁻¹ COT). Globalement, ces paramètres sont cohérents avec une MO de type III (d'origine continentale) et confirment les résultats obtenus par palynofacies et mesures des pouvoirs réflecteurs.

³⁴ La pyrolyse Rock-Eval est généralement utilisée dans l'étude des roches mères pétrolières et les différents paramètres obtenus permettent de classer la matière organique de ces roches en trois grands types, selon la nature du milieu de dépôt. Le type I (milieu lacustre) est caractérisé par de fort IH et faible IO, le type II (milieu marin), est caractérisé par des IH et IO plus moyen, et le type III (milieu continental), est caractérisé par de forts IO et faibles IH.

³⁵ Pour nos échantillons, le COT des roches et plaquettes est majoritairement mesuré durant la phase d'oxydation (les RC représentent en moyenne 95 % du TOC) : les quantités de HC mesurées par le capteur FID durant la phase de pyrolyse sont négligeables (ceci expliquant les faibles IH mesurés). Le signal dont est issu le Tmax sort donc tout juste du « bruit de fond » de ce capteur : ceci explique sans doute la dispersion des mesures.

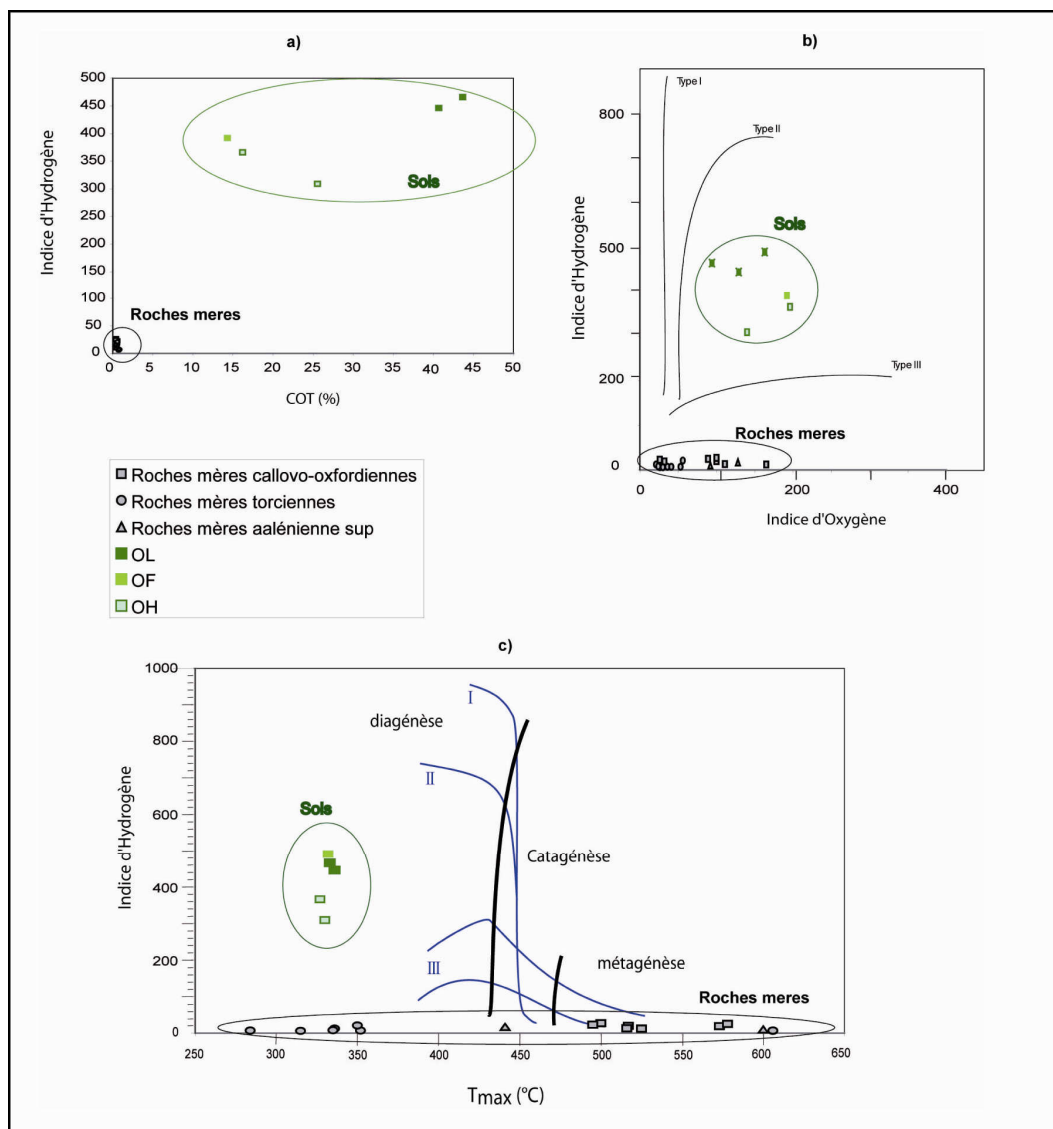


Figure III-45 : a) graphique IH / TOC, b) graphique IH / IO et c) graphique IH / Tmax des échantillons OL, OF, OH et roches mères (échantillonnage 2006).

D-1-3) Les analyses élémentaires et isotopiques

La MOR des sols est caractérisée par des C/N élevés de l'ordre de 70 et des $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ variant entre -26,2 et -28,4 ‰, caractéristiques de végétaux terrestres (Trumbore et Druffel, 1995).

La MOF est caractérisée par des C/N faibles de l'ordre de 10 et des $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ plus élevés, variant entre -25,2 et -26,9 ‰.

D-1-4) Analyses moléculaires

La MOR : la signature moléculaire des échantillons les plus proches de la surface (A-BRV1-2 et A-BLA-3tf) est dominée par les alcanes de haut poids moléculaires (n supérieurs à 23), avec une nette prédominance des alcanes à nombres impairs de carbone. Cette signature, caractéristique de plantes supérieures, est accompagnée d'un cortège d'hydrocarbures aromatiques marqueurs de résine (toujours issus de végétaux supérieurs).

La MOF : La signature moléculaire des échantillons de roches (L8to9 et Br-6R2) est dominée par les alcanes de faibles poids moléculaires (n inférieurs à 22), sans réelle prédominance des alcanes à nombres de carbone pairs, ou impairs. Ce résultat est similaire à celui obtenu par Lichtfouse *et al* (1997 a) pour les n-alcanes des sols du bassin parisien (cf. § I-A-3-2-2).

D-1-5) Pertinence des analyses dans le cas de mélanges MOF / MOR

Les analyses optiques :

Les méthodes optiques, et notamment le palynofacies, permettent une bonne discrimination de la MOR et MOF selon la nature et la morphologie des particules organiques. La MOF semble être un ensemble complexe de populations de natures diverses, le plus souvent d'origine continentale (vitrinite et inertinite). Cette MO apparaît très mature et semblable à celle observée par Artru (1972) sur l'ensemble des « terres noires » du Sud-Est de la France (LCO, amorphes et pollens). Ces méthodes n'autorisent cependant qu'une quantification relative des particules de MO.

La pyrolyse Rock-Eval :

La pyrolyse Rock-Eval permet de discriminer la MOR de la MOF, et confirme l'origine continentale du matériel fossile. Cependant, aucun paramètre délivré n'est susceptible d'autoriser la distinction MOF / MOR dans le cas d'un mélange entre ces deux phases. Plus précisément et par paramètres :

- **COT** : les roches et sols présentent des valeurs de COT (%) différentes, mais ce paramètre ne permet pas, par définition, la ségrégation de la fraction récente et fossile de la MO dans le cas d'un mélange ;
- **IH** : les sols et les roches mères possèdent des IH très différents (forts pour les sols et faibles pour les roches). Cependant, la diminution de ce paramètre lors la dégradation pédologique du matériel organique récent rend l'IH non discriminant (une valeur faible peut être représentative de MOR dégradée et / ou de MOF) ;
- **IO** : Les échantillons de roches mères possèdent des IO très variables, pouvant recouper ceux mesurés dans les sols. Ce paramètre n'est donc pas discriminant ;
- **Tmax** : La très forte dispersion des valeurs de Tmax observées dans les roches ne permet pas d'avancer plus avant. Nous pouvons tout au plus noter que la MOR ne possède pas de Tmax élevés.

Le rapport C/N

De la même manière que le paramètre IH délivré par la pyrolyse Rock-Eval, le C/N tend à diminuer lors de l'évolution pédologique du matériel organique récent (cf. § II-C-2-2).

Ce phénomène rend impossible toute conclusion dans le cas d'un mélange de MOR potentiellement dégradée, et de MOF.

$\delta^{13}\text{CPDB}\%$

Pour les échantillons qui nous concernent, les valeurs de $\delta^{13}\text{CPDB}\%$ de la MOF (-25,2 et -26,9 ‰) et de la MOR (-26,2 à -28,4 ‰), sont trop proches pour que ce paramètre soit réellement discriminant.

Les analyses moléculaires :

L'analyse moléculaire permet de discriminer certains composés typiques de la MOR ou de la MOF (n-alcanes longs ou courts). Cependant les taux d'extraction obtenus sont faibles (parfois inférieurs à 100µg/g). Ceci sous entend que cette analyse ne décrit qu'une faible proportion du contenu organique des échantillons.

D-2) Suivi de la contribution fossile dans les compartiments étudiés

Les marqueurs potentiels de MOF et MOR étant définis, nous proposons de les suivre dans les différents compartiments étudiés.

D-2-1) Le compartiment altérites, échantillons PL

La formation d'altérites est majoritairement dominée par l'altération chimique des roches (Campy et Macaire, 1989 ; 2003) et, sur le site de Draix, par la cryoclastie (Mathys, 2006). La transition Roches / Altérites semble avoir très peu d'influence, à la fois sur la quantité et la qualité de la MOF. En effet, le contenu organique de ces échantillons semble identique à celui des roches mères sous-jacentes (palynofacies, mesures du pouvoir réflecteur et C/N). Notons que la pyrite chute systématiquement le long des profils PL (jusqu'à parfois disparaître).

L'analyse moléculaire montre une répartition bimodale de n-alcanes dominée à la fois par les alcanes de haut poids moléculaires (n supérieurs à 23), typiques de la MOR, et par les n-alcanes de plus faibles poids moléculaires (n inférieurs à 22), typiques de la MOF. Ceci prouve l'existence d'une contribution récente dans ces échantillons.

Deux points sont tout de même à développer :

- 1) la chute de COT associée à la disparition relative de MOAO dans le profil 06-BRU S1 (45 cm de profondeur) pourrait être interprétée, à lithologie initiale identique, comme une perte de cette MO. Cependant les analyses ICP montrent un changement des teneurs en SiO₂, Al₂O₃ et CaO au même niveau, ce qui témoigne plutôt d'un changement de lithologie, et probablement de contenu organique ;

- 2) les LCO diminuent au sein des échantillons PL du profil BRU S3 Lat ; de la profondeur vers la surface (passant de 53 à 35 % de particules comptées). Inversement, les particules de MOAr augmentent sur ce même intervalle dans des proportions similaires (de 29 à 56 % des surfaces comptées). La stabilité des paramètres Rock-Eval (COT et IH) montre que la perte de COT est minime, voir nulle, le long du profil : nous pouvons donc suggérer que les LCO subissent une transformation, dont le produit final se confond avec les MOAr.

Cette hypothèse est appuyée par le fait que certaines MOAr des ces échantillons se distinguent des autres par la présence des fragments de particules réfléchissantes visibles en lumière réfléchie (figure III-46). Ce phénomène sera discuté ultérieurement, dans les paragraphes B et C du chapitre IV.

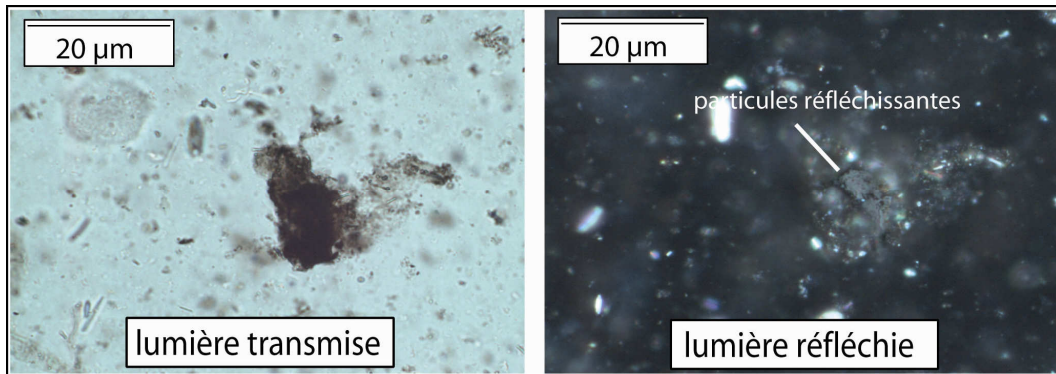


Figure III-46 : Exemple de particules amorphes du profil BRU S3 Lat contenant des particules réfléchissantes.

D-2-2) Le compartiment altérites, échantillons TF

Les paramètres délivrés par l'analyse Rock-Eval montrent des teneurs en COT et des valeurs d'IH généralement plus importantes que celles mesurées dans les roches mères et échantillons PL adjacents. Il en va de même avec le paramètre C/N. Certaines données sous entendent cependant la parenté entre les MO contenues dans les échantillons PL et TF, notamment les évolutions parallèles des paramètres COT et IH lors du changement de lithologie du profil 06-BRU S1.

La présence de MO fossile est confirmée par les études optiques et moléculaires :

- nous observons dans des proportions variables (20 à 90% cumulé) les particules LCO, MOAr, MOAO et DG typiques de la MOF dans les échantillons TF. Cette contribution en MOF est confortée par deux points supplémentaires : -1) l'évolution parallèle des concentrations en MOAO lors du changement de lithologie du profil 06-BRU S1, -2) la correspondance des pouvoirs réflecteurs mesurées dans les échantillons TF et les échantillons PL adjacents³⁶ ;

³⁶ Nous notons que les particules de pyrite ont presque totalement disparu dans les TF.

- nous observons une répartition bimodale (échantillons A-BRV1 6 TF et ABLAV1 4 TF) des n-alcanes dominée à la fois par les alcanes de haut poids moléculaires (n supérieurs à 23), typiques de la MOR, et par les n-alcanes de plus faibles poids moléculaires (n inférieurs à 22), typiques de la MOF.

D-2-3) Le compartiment sol, échantillons d'horizons A

La formation des sols est majoritairement contrôlée par les altérations (bio)chimiques (infiltration et activité biologique).

Tout comme les échantillons TF, ces échantillons se caractérisent par des COT et IH plus fort que les échantillons sous jacents. La présence de MOF dans ces échantillons est mise en évidence par les études optiques : -1) les LCO, MOAr, MOAO et DG, typiques de la MOF, représentent de 5,5 à 70 % des surfaces comptées selon les échantillons, et -2) nous retrouvons des particules au fort pouvoir réflecteur dans chaque échantillon A analysé.

Cette contribution fossile est, par ailleurs, confortée par l'âge radiocarbone mesuré au sein de l'échantillon 06-LA S2 A atteignant 555 ± 30 BP³⁷. En effet les sols du bassin versant du Laval sont connus pour avoir moins de 100 ans, voire plus vraisemblablement moins de 50 ans (Vallauri, 1997)³⁸.

D-2-4) Le compartiment particules fluviales

Les particules fluviales sont, sur le secteur, le produit de l'altération mécanique des roches des bassins versants (Di-Giovanni *et al*, 1999a) : celle-ci ne semble pas avoir d'effet sur la MOF. Les particules fluviales du Laval et du Moulin possèdent en effet des COT et IH très légèrement supérieurs à ceux mesurés dans les roches, ce qui s'explique sans doute par la présence des quelques particules de MOR observées (LC, AG, éléments figurés et MOAgc dont les proportions cumulées sont de l'ordre de 15%). Le reste de la MO est exclusivement composée de LCO, MOAr et DG. L'origine fossile de la MO est confirmée par trois points supplémentaires :- 1) la présence systématique de pyrite dans les échantillons, alors que cette

³⁷ Mesure effectuée au Poznań Radiocarbon Laboratory (Pologne).

³⁸ L'historique de la végétalisation des bassins de Draix sera présenté dans le chapitre V-C-1.

dernière disparaît systématiquement dans les profils étudiés (elle disparaît notamment presque totalement durant les six mois séparant les échantillonnages des profil 06-LA A et LA A R) ; -2) les forts pouvoirs réflecteurs mesurés dans les MES du Laval (1,1 à plus de 7%), et -3) l'âge radiocarbone de 21700 ± 240 BP³⁹ de l'échantillons Laval MES 07/12/2006.

Les échantillons du Brusquet se démarquent par des TOC et IH beaucoup plus forts (de l'ordre de 1 % et de 100 mg HC.g⁻¹COT), et par des proportions en particules de MOR pouvant atteindre 50 % des surfaces comptées. Ce phénomène peut s'expliquer par le fort taux de végétalisation du Brusquet face au Laval et au Moulin (87 % pour le Brusquet, 32 % pour le Laval et 46 % pour le Moulin). Le reste de la MO est typiquement fossile, ce qui est confirmé par -1) la présence systématique de pyrite dans les échantillons ; -2) les forts pouvoirs réflecteurs mesurés (1 à plus de 5%) ; et -3) un âge radiocarbone de 9880 ± 60 BP³⁹ pour l'échantillon Brusquet MES 12/07/2006.

³⁹ Mesures effectuées au Poznań Radiocarbon Laboratory (Pologne).

E) Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre représentent une première étude “pluri-compartiments”, “pluri-analytique” sur le devenir de la MOF libérée par l’altération des roches sédimentaires. Les résultats obtenus pour les échantillons prélevés durant les missions de 2001 et 2006 sont concordants et attestent de la contribution significative de matériel organique fossile dans l’ensemble des compartiments étudiés (tableau III-13). Plus précisément, les transferts Roches / Altérites (altération chimique) et Roches / Particules fluviales (érosion mécanique) ne semblent pas avoir d’incidence quantitative ou qualitative sur la MOF. Les transferts Altérites / Sols et échantillons PL / TF (dominées par les altérations biochimiques) sont plus difficiles à décrire car ces échantillons sont un mélange de MOR et de MOF, et aucune méthode ne permet une quantification précise de la part prise par l’une ou l’autre. Nous notons, enfin, que la pyrite semble beaucoup plus sensible aux altérations que la MO, ce qui est en accord avec les travaux de Petsch *et al* (2000).

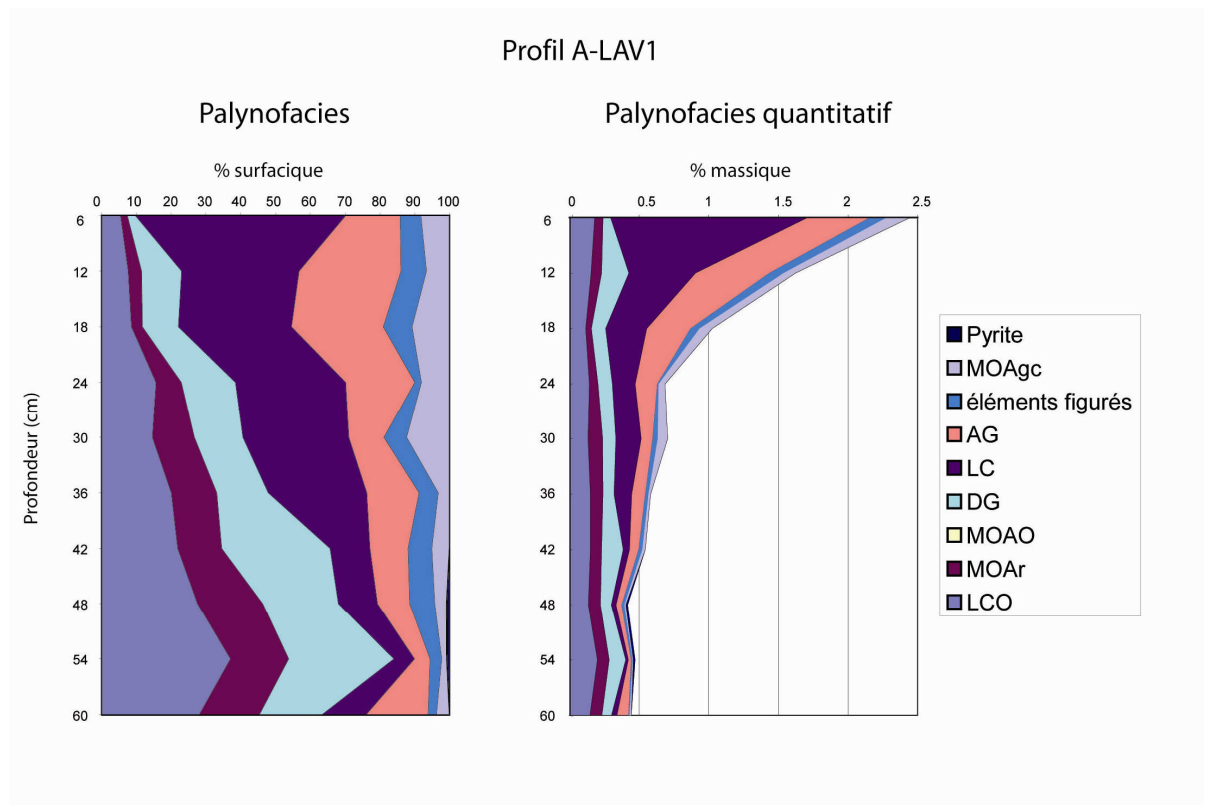
Nous confirmons ainsi la résistance de la MOF face aux altérations et son importance au sein du cycle du carbone. Mais l’étude plus précise des pertes associées à ces différents transferts nécessite le développement d’une nouvelle méthode de quantification.

	Roches brutes	Altérite (échantillons PL)	Altérite (échantillons TF)	Sols (horizon A)	Particules fluviale (MES et CF)
% de MOF (palynofacies)	100 % des surfaces comptées	> 95 % des surfaces comptées	de 20 à 90 % des surfaces comptées	de 5,5 à 70 % des surfaces comptées	de 47 à 97 % des surfaces comptée

Tableau III-13 : % de MOF au sein de la MO des différents compartiments étudiés (Palynofacies, % des surfaces comptées).

Chapitre IV

Comportement de la MOF face aux altérations supergènes



Où l'on raisonne en milligrammes...

Le chapitre précédent a permis de mettre en évidence la contribution relative conséquente de MOF dans l'ensemble des compartiments étudiés (altérites, sols et particules fluviales). Cependant, aucune des méthodes utilisées n'a autorisé une réelle quantification de cette contribution, et encore moins celle des pertes éventuelles lors des transferts de MO entre les différents compartiments.

Parmi ces méthodes, celles se basant sur l'optique, notamment le palynofacies, permettent la prise en compte de la pluralité de la MOF et se révèlent, à priori, les plus adaptées pour son suivi. Nous proposons donc, dans ce chapitre, un développement de la méthode des palynofacies, que nous qualifierons de quantitatif, en vue de l'obtention de pourcentages massiques pour chaque type de particules observées.

Ce chapitre s'articule donc autour de trois principales parties. La première porte plus précisément sur la quantification de MOF dans les différents compartiments étudiés. La seconde porte sur les tentatives menées de dégradations expérimentales de MOF et MOR selon diverses modalités (oxydation, hydrolyse, altération bactérienne) et la troisième sur la confrontation des données obtenues à la fois sur le terrain et par voies expérimentales. Elles alimenteront une conclusion.

A) Quantification de la contribution et des pertes de MOF au sein des compartiments

A-1) Développement d'une nouvelle méthode de quantification : le palynofacies quantitatif

Au cours des dernières décennies, certaines études ont déjà abordé le problème de la quantification de microfossiles, ou de pollens, au sein de sédiments (Battarbee et Kneen, 1982 ; Vernal *et al*, 1987 ; Brugman *et al*, 1994). A cet effet, ces auteurs ont utilisé différents standards (pollens de lycopodium ou d'eucalyptus, microsphères de polystyrène) incorporés en nombre connu dans les échantillons. L'examen des proportions de standards et de particules observées leur a permis de quantifier le nombre total de particules présentes au sein des échantillons étudiés.

Le palynofacies quantitatif développé pour cette étude est une adaptation de ces techniques, se basant par contre sur l'incorporation de standards en masse connue. Nous avons choisi le pollen cupressus car ce dernier présente une nette fluorescence sous excitation UV (figure IV-1), favorisant son observation.

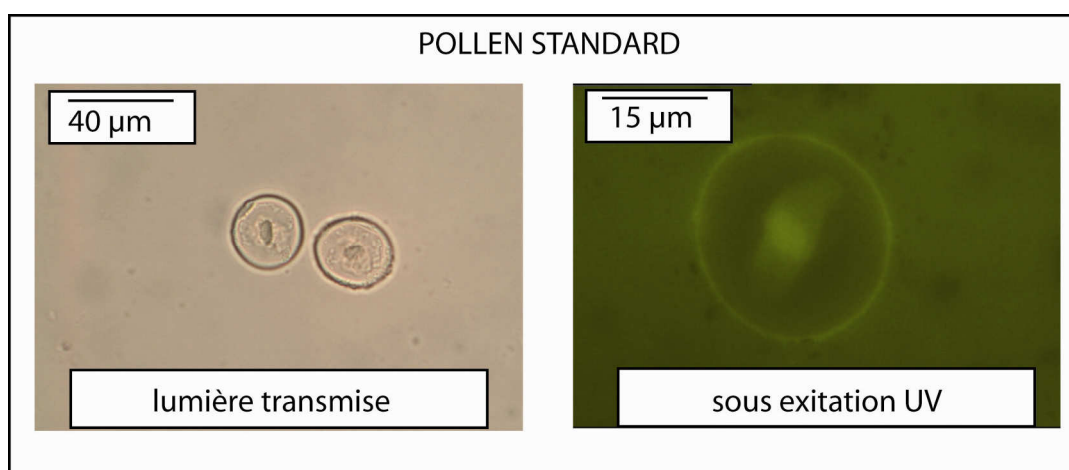


Figure IV-1- Pollen standard (Cupressus), en lumière transmise et sous excitation UV.

A-1-1) Préparation des concentrés organiques et incorporation du standard

Les échantillons (1g environ), préalablement séchés et broyés⁴⁰ ont été soumis à une succession d'attaques acides afin de supprimer la phase minérale. Ces dernières s'enchainent de la façon suivante :

- 50 ml d'acide chlorhydrique (HCL) pendant 30 minutes afin de dissoudre les carbonates. Les échantillons sont ensuite rincés à l'eau distillée.
- 50 ml d'acide fluorhydrique (HF) pendant 12 heures, dont 2 chauffées à 50°C, afin de dissoudre les silicates. Les échantillons sont ensuite rincés à l'eau distillée.
- 50 ml d'acide chlorhydrique (HCL) pendant 30 minutes afin de dissoudre les chlorures et fluorures potentiellement formés durant les étapes précédentes⁴¹.

10 à 30 % du concentré organique obtenu sont ensuite prélevés⁴², auxquels sont ajoutés 0,5 à 1 mg de standard⁴³. 100 µl de la solution obtenue sont ensuite montés entre lame et lamelle pour l'observation microscopique.

A-1-2) Mesure de la densité des particules

L'observation microscopique ne permettant que de délivrer une information surfacique, l'obtention d'une estimation massique des particules de MOF et MOR observées a nécessité la prise en compte de leurs densités.

L'obtention de ces dernières a été acquise après séparation des diverses particules présentes dans les concentrés organiques d'un échantillon OH (profil 06-LA S2) et d'une roche mère (06-LA S2 PL 135 cm) à l'aide de liqueurs denses constituées d'eau, d'éthanol et de bromoforme. Ces deux concentrés ont été retenus car leurs contenus organiques recouvrent l'ensemble des particules de MO observées dans ce travail.

⁴⁰ *Le broyage ne doit pas être trop fin afin de ne pas fracturer les particules de MO et de maintenir leurs morphologies*

⁴¹ *Les échantillons ont ensuite subi une succession de rinçages à l'eau distillée, jusqu'au retour à un PH des solutions proche de la neutralité.*

⁴² *La quantité de concentré initial étant trop importante pour la masse de standard à intégrer.*

⁴³ *La densité de la solution et la masse de standard à incorporer sont deux paramètres sur lesquels l'opérateur peut jouer afin d'homogénéiser les lames. Ainsi une solution trop dense handicapera l'observation de la MO, et trop peu de standard rendra l'estimation des % massiques des particules imprécise*

A-1-2-1) Protocole

Au sein de chaque liqueur dense, correspondant à des densités de 0,8 , 1, 1,3 , 1,5 , 1,7 à 1,9⁴⁴, nous avons séparé, lorsque cela étant possible, le surnageant, la fraction en suspension et la fraction dense ayant décantée. Cette dernière étant par la suite mélangée à la solution de densité supérieure.

Chaque fraction récupérée a ensuite été soumise à la pyrolyse Rock-Eval et au palynofacies. La part de Corg associée à chaque type de particule au sein de chaque fraction densimétrique a été obtenue de la façon suivante :

$$\text{eq1) Corg (mg) d'une particule pour une fraction} = \text{Poids de la fraction} \times \text{COT de la fraction} \times \% \text{ surfacique de la particule dans la fraction}$$

A-1-2-2) Résultats

- Echantillon 06 LA S2 OH (Figure IV-2):

Cet échantillon est majoritairement constitué des particules typiques de la MOR : amorphes, LC et éléments figurés.

- Les amorphes : Les MOAgc se retrouvent principalement dans les fractions les moins denses et le maximum de Corg est récupéré à la densité de 1 (15,75 mg). Les particules AG ont une répartition plus complexe, avec deux maximums de Corg récupérés entre 0,8 et 1 (59,6 mg de Corg), et entre 1,3 et 1,5 (102,4 mg). Cette répartition bimodale peut s'expliquer : -1) par une confusion possible entre les particules de AG et LCGD ; -2) par l'existence de plusieurs types de particules AG de densités différentes.

- Les LC : Les particules de LCT et LCDG sont majoritairement collectées entre les densités de 0,8 et 1. Les particules de LCDs sont plus denses (15,3 mg de Corg récupérés entre les densités 1,3 et 1,5).

- Les éléments figurés : Les particules myc et mbr sont majoritairement collectées entre les densités de 0,8 et 1. Les particules de SO-PO peuvent se retrouver dans une grande gamme de densité, allant de 0,8 à 1,5.

⁴⁴ Ces densités ont été mesurées à l'aide d'un densimètre flottant.

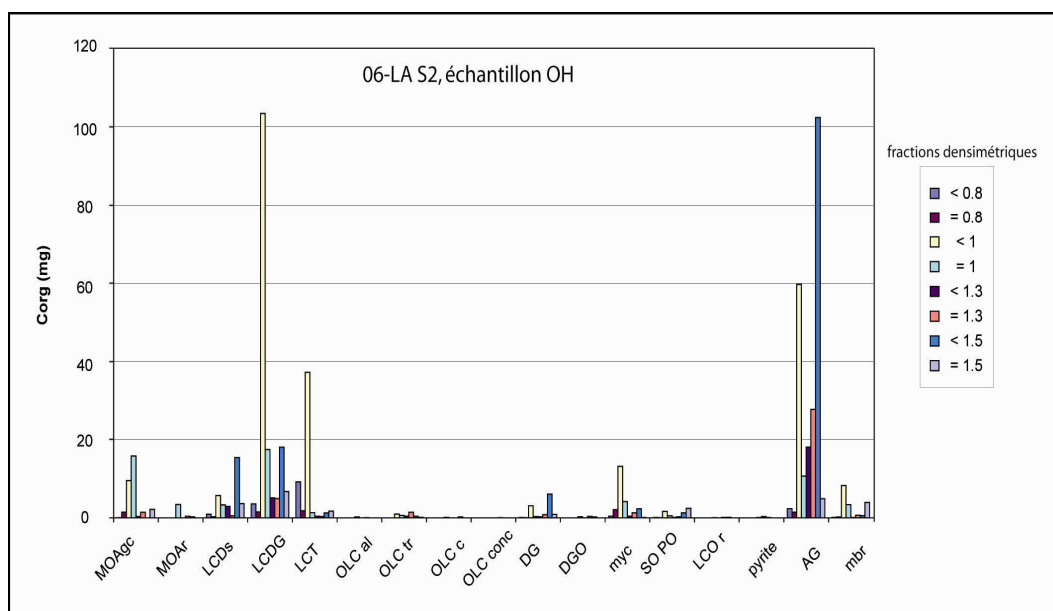


Figure IV-2 : mesure des densités des particules observées en palynofacies, échantillon 06 LA S2 OH.

- Echantillon 06 LA S2 PL 135 cm (Figure IV-3):

Cet échantillon est majoritairement constitué des particules typiques de la MOF. Ces particules étant généralement plus denses (>1) que celles observées dans l'échantillon OH, nous avons donc débuté la séparation à la densité de 1,3.

- Les amorphes : Nous observons une matière amorphe proche de la MOAgc dans les fractions de densités inférieures ou égales à 1,3. Les particules de MOAr sont majoritairement récupérées dans deux fractions densimétriques : celle inférieure à 1,3 et celle égale à 1,5 (8,3 et 10,7 mg de Corg).

- Les particules opaques : Ces particules possèdent des densités très diverses selon leurs morphologie : - les LCO al sont collectés entre 1,3 et 1,5 (2,4 mg), - les LCO c se retrouvent entre 1,7 et 1,9 (1,96 mg), - les LCO conc sont relativement bien répartis avec une prédominance entre 1,5 et 1,7 (1,96 mg), - les LCO r se retrouvent majoritairement dans les fractions les plus denses ($<1,7$ et $<1,9$) et - les LCO tr sont préférentiellement remarqués dans deux fractions, celle inférieure à 1,3 (4,9 mg) et celle comprise entre 1,3 et 1,5 (11mg). Cette répartition bimodale peut s'expliquer de deux manières : -1) par une confusion avec certaines particules de DGO ; - 2) par l'existence de plusieurs populations au sein du groupes des LCO tr.

- Les débris gélifiés : Les DG, bien que peu présents, sont récupérés dans l'ensemble des fractions comprises entre 1 et 1,5. Nous notons cependant une légère prédominance dans les fractions égales ou inférieures à 1,3. Les DGO possèdent une répartition similaire (13,8 mg de Corg dans la fraction de densité < 1,3).
- Quelques particules de pyrites sont observées dans les fractions les plus denses. Elles sont systématiquement assemblées à d'autres types de particules sous forme d'amas. Les « poids » récupérés sont de 4,90 et 3,14 mg aux densités <1,7 et <1,9.

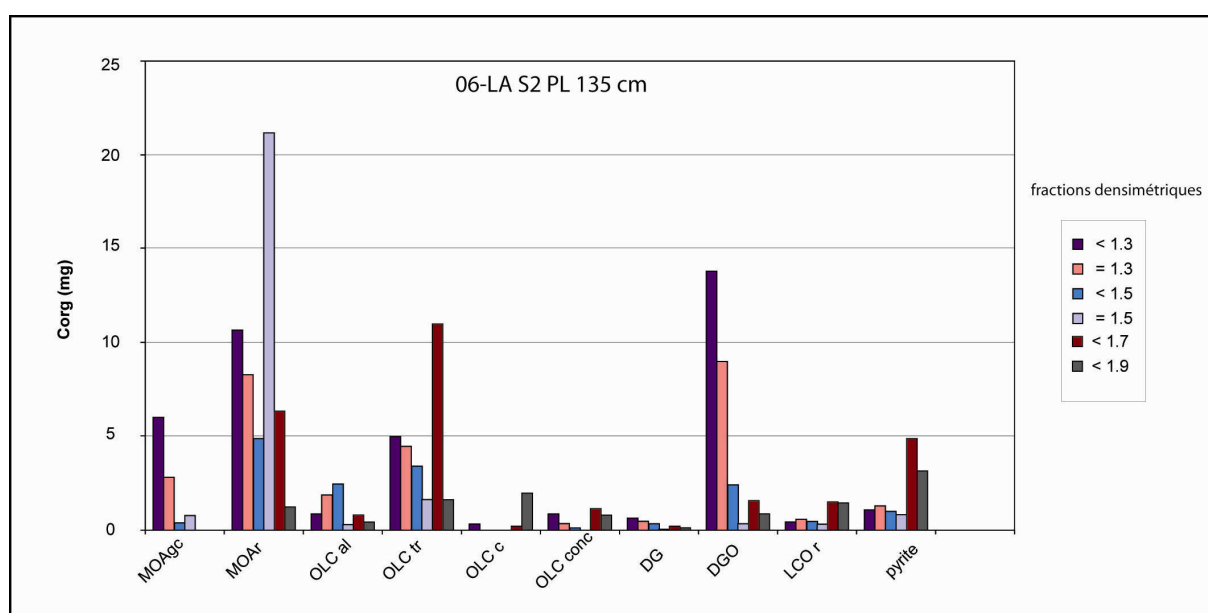


Figure IV-3 : mesure des densités des particules observées en palynofacies, Echantillon 06 LA S2 PL 135 cm.

Ces résultats nous permettent désormais d'associer une densité moyenne à chaque type de particule (Tableau IV-1). Celle-ci est de 1 pour les MOAgc, 1,5 pour les MOAR, 1,4 pour les LCDs, 0,9 pour les LCT, 0,9 pour les myc, 1,3 pour les SO PO, 1,4 pour les Ag, 0,9 pour les mbr, 1,4 pour les LCO al, 1,6 pour les LCO tr, 1,8 pour les LCO c, 1,7 pour les LCO r⁴⁵, 1,2 pour les DG et 1,15 pour les DGO⁴⁶.

⁴⁵ Notons que les densités attribuées aux LCO et DG sont compatibles avec celles proposées dans la bibliographie pour les vitrinites et inertinites (1,2 à 2,25 selon le degré de maturité, Tyson, 1995).

⁴⁶ La densité du pollen standard cupressus a été mesurée de la même manière, et est de 1,3. Nous avons affecté la densité de 5 à la pyrite (Tyson, 1995).

densité des particules								
MOAgc	MOAr	LCDs	LCDG	LCT	LCO al	LCO tr	LCO c	LCO conc
1	1.5	1.4	0.9	0.9	1.4	1.6	1.8	1.7
DG	DGO	myc	SO PO	LCO r	pyrite	AG	mbr	standard
1.2	1.15	0.9	1.3	1.7	5	1.4	0.9	1.3

Tableau IV-1 : densités moyennes attribuées aux particules observées.

A-1-3) Estimation des % massiques des particules

Les % massiques des particules au sein d'un échantillon ont été obtenus en deux étapes :

-1) Première étape : obtention de la masse comptée

$$\text{eq2) Masse comptée} = \frac{\text{Masse de standard incorporé} \times \% \text{ surfacique de la particule dans la fraction}}{\% \text{ surfacique du standard}} \times \frac{\text{Densité de la particule}}{\text{Densité du standard}}$$

-2) Seconde étape : obtention du % massique

$$\text{eq3) \% massique} = \frac{\left(\frac{\text{Masse comptée} \times 100}{\% \text{ de concentré organique prélevé}} \right)}{\text{Masse de l'échantillon initial}}$$

Quantifier un % massique de MOF au sein d'un compartiment est une chose. Estimer des pertes de MOF entre différents compartiments en est une autre. En effet, les phases minérales de ces derniers ont pu subir des variations de compositions significatives lors des processus d'altération (par exemple, une dissolution des carbonates). Ainsi, un % massique de MOF équivalant sur deux compartiments peut être interprété de deux façons : -1) par une absence de perte de MOF lors du transfert, -2) par des pertes de MOF associée à une perte de phase minérale.

Pour s'affranchir de ce problème, et sachant que l'estimation des pertes est le but premier de notre étude, tous les % massiques ont été normés par rapport aux % en Al_2O_3 obtenus par ICP au sein de chaque échantillon (ces rapports sont notés PNA).⁴⁷

⁴⁷ Cet élément est en effet connu pour être le plus résistant face à la dissolution chimique (Campy et Macaire, 1989, 2003).

A-2) Résultats : bassin versant du Laval

Les résultats obtenus pour ce bassin sont compilés sous forme d'article : "Quantitative Palynofacies analysis as a new tool to study transfers of fossil organic matter in recent terrestrial environments" (en préparation).

Les investigations ont été menées sur 96 échantillons (profils d'altération et particules fluviatiles du Laval) et les résultats montrent que la méthode du palynofacies quantitatif est adaptée à ce type d'étude : la contribution et les pertes en MOF ont, en effet, pu être quantifiées dans l'ensemble des compartiments étudiés. Ces pertes dépendent du type d'altération, mais aussi du type de particule. Ainsi l'altération mécanique des roches n'a aucun impact qualitatif ou quantitatif sur la MOF, tandis que les altérations (bio)chimiques peuvent être responsables de la perte de 30 % de la MOF lors des transferts PL / Sols et PL / TF. Par ailleurs, nous notons un comportement différentiel des diverses particules organiques : les particules DG et MOAr apparaissent plus labiles que les LCO.

Les détails des résultats du palynofacies quantitatifs sont présentés en annexes 29 à 33, et ceux du palynofacies quantitatifs normés aux teneurs en Al_2O_3 sont présentés en annexes 37 à 41.

Quantitative Palynofacies analysis as a new tool to study transfers of fossil organic matter in recent terrestrial environments.

Graz Y¹., Di-Giovanni C¹., Boussafir M¹., Copard Y²., Laggoun-Défarge F¹., Lallier-Vergès E¹., Baillif P¹., Perdereau L¹.

¹ ISTO, UMR 6113 CNRS/Université d'Orléans, Bat ISTE, rue de la Férollerie 45071 Orléans Cedex 2, France

² M2C, UMR 6143 CNRS/Université de Rouen, place E. Blondel, Bat. Irese A, Université de Rouen, 76821 Mont Saint Aignan Cedex, France

Abstract: Classical palynofacies method, which consists in an organic concentrate microscopic observation after mineral phase dissolution, is generally used in order to study sedimentary organic matter. The present work relate to the development of a new quantitative palynofacies method, which allow to obtain observed organic particles mass concentrations using a pollen standard and particles densities. Such method was developed in the aim to precise the fossil organic carbon (FOC) input and fate into modern environments, due to sedimentary rocks weathering (bio)chemical and mechanical weathering). Studied samples were collected into different pools, like bedrocks, weathering profiles, soils and riverine particles in an experimental watershed “Le Laval”. This watershed overlying Callovo-Oxfordian marls (1km² in areas) is located near Digne (Alpes-de-Haute-Provence, France). Geochemical complementary investigations were applied to the studied samples: Rock-Eval 6 pyrolysis, and inductively coupled Plasma emission spectrometry (ICP). Obtained results show that quantitative palynofacies method is suitable for FOM studies in modern environments, indeed, FOM particles are quantified in the different pools. Obtained results show that FOM alteration depends on the kind of weathering, but also on the kind of particles. (Bio)chemical weathering leads to organic particles concentration losses that do not exceed 30 %. Mechanical weathering has no qualitative and quantitative influence on the FOM observed particles, which feeds directly riverine stocks. FOM appears to be very resistant to weathering process, that highlights its contribution into supergene pools and then carbon cycle. Quantitative palynofacies is a new method adapted to this kind of study, but can also be developed to other palynologic, paleoenvironmental or archeological studies.

Keywords: Quantitative palynofacies, fossil organic matter, experimental watersheds, marls, carbon cycle, weathering processes.

1 - Introduction

The current increase of greenhouse gases induces a series of climatic, environmental, and human consequences (IPCC, 2007). Study of greenhouse gases behaviour, such as CO₂ and CH₄, requires estimations of carbon fluxes between the different pools, i.e. ocean, continental hydrosphere, soils, biomass, and lithosphere (Houghton, 1998). Numerous estimations of carbon fluxes from soils and rivers have been calculated (Eswaran *et al.*, 1993 ; Balesdent, 1996 ; Batjes, 1996 ; Adams and Faure, 1996 ; Carter *et al.*, 1997 ; Holland, 1978 ; Berner *et al.*, 1983 ; Degens *et al.*, 1991 ; Probst, 1992 ; Amiotte Suchet ; 1995; Ludwig *et al.*, 1996 ; Aitkenhead and McDowell, 2000). However, such estimates generally do not take into account Fossil Organic Carbon (FOC) fluxes, originating from rock weathering and erosion of ancient and recent sediments. Although FOC is generally considered as degradable and as a carbon source for the atmosphere (Berner, 1989), its occurrence was highlighted in different compartments, such as rivers (Kao *et al.*, 1996; Di-Giovanni *et al.*, 2000, Massiello *et al.* 2001 ; Blair *et al.*, 2003, 2004 ; Raymond and Bauer, 2001 , 2004), soils (Lichtfouse *et al.*, 1997a,b ; Di Giovanni *et al.*, 1998, 1999a,b, 2000 ; Copard *et al.*, 2006) and marine sediments (Combaz *et al.* 1974 ; Tyson, 1995 ; Di-Giovanni *et al.*, 1997, 1999a, 2000 ; Eglinton, 1997 ; Leithold *et al.* 2001 ; Blair *et al.*, 2003 ; Dickens, 2004a,b ; Wakeham *et al.*, 2004), revealing a significant resistance to weathering. At a global scale, the lonely chemical weathering of shales and carbonates annually releases between 0.1 and 0.04 Gt organic carbon/year (Di-Giovanni *et al.* 2002 ; Copard *et al.* 2007), that is comparable with the total fluvial particular organic carbon export to ocean (between 0,09 et 0,3 GtC/an, Berner, 1992 ; Ludwig *et al.*, 1996 ; Stallard, 1998).

These studies used a large analytical panel. As examples Di-Giovanni *et al.* (1999a, b), Sebag *et al.* (2005, 2006) and Noel (1992) proposed microscopic investigations of organic content from soils, lacustrine sediments and rivers. Raymond and Bauer (2001) investigated isotopical and chemical characteristics of fluvial samples. Lichtfouse *et al.* (1997a,b) used molecular and isotopical analysis of soils samples and Petch *et al.* (2000) focused their studies on weathered marl profiles and use elemental, molecular and IR spectra analysis. Although such analyses highlighted the occurrence of the FOC in the different studied pools, they presented some disadvantages. Microscopic analyses allowed to discriminate between fossil and recent material, but did not permit FOC quantification in the case of a mixed organic matter composed of FOC and recent organic carbon (ROC). As a matter of fact, along profiles

the decrease of fossil material contents can be interpreted either as a mineralisation, or a dilution. Studies based on chemical, elemental and isotopical analyses were applied on bulk samples and, as for microscopic analyses, interpretations could be difficult in the case of mixed organic matter. Molecular analyses concerned only a minor part of organic material, e.g. lipids.

In this work, we proposed a new microscopic method based on quantitative estimation of palynofacies. Such method has already been developed by different authors (Battarbee, 1982 ; Vernal, 1987) in order to evaluate diatom or pollen or microfossil abundance in sediments. These quantitative study use pollens (lycopodium, eucalyptus) or polystyrene microspheres as standard and allow estimating particles occurrence reported to the number of standard added but can not estimate mass concentrations. That we propose a method, using a pollen standard and organic particles densities, witch allows obtaining the mass concentrations of each kind of particles.

2 – Study area and sampling

Investigations were carried on weathered marls profiles because OC content of such a sedimentary rock is higher than carbonate and sandstones, and these rocks represent about 30 % of the global continental surface (Amiotte-Suchet *et al*, 2003). The studied area is “Le Laval” watershed located near Digne (Alpes-de-Haute-Provence, France) (figure IV-4). The watershed is characterised by a low vegetation density (21 %) composed of grasses, graminaceous, broom, scots pines and oaks overlying Callovo-Oxfordian marly limestones (Mathys, 2006). Four weathering profiles were collected: P1 from bare area is an 80 cm depth profile not covered by vegetation, samples are made up of compact fragments of marls, picked up every 5 cm, from the bedrock (>70 cm depth) to the surface. P1A is the same profile collected six months after the first sampling. P2 is a 140 cm depth profile recovered by soil and vegetation. P2 consists of (i) three soil layers (Litter – OL, humus layer- OH and Organo-Mineral layer – A), (ii) compact marls fragments (PL samples) and of fine and friable elements (TF samples). PL and TF samples were collected at the same level every 5 cm, from the bedrock (135 cm) to the surface. P3 profile of 60 cm depth concerns the transition between weathered rocks and soil layers (A layer). Watershed riverine particles were also studied. We distinguished height Laval Suspended Load samples (SL samples) that were

picked up with automatic sampling between July 2006 and January 2008 and two watershed Bed Load samples (BL samples) picked in 2002 and 2006. Riverine particles at the downstream of the watershed were also picked up in order to monitor the fate of FOC exported in rivers: two Bed Load (Bouinenc BL, Bléone BL) and one Rhône river SL.

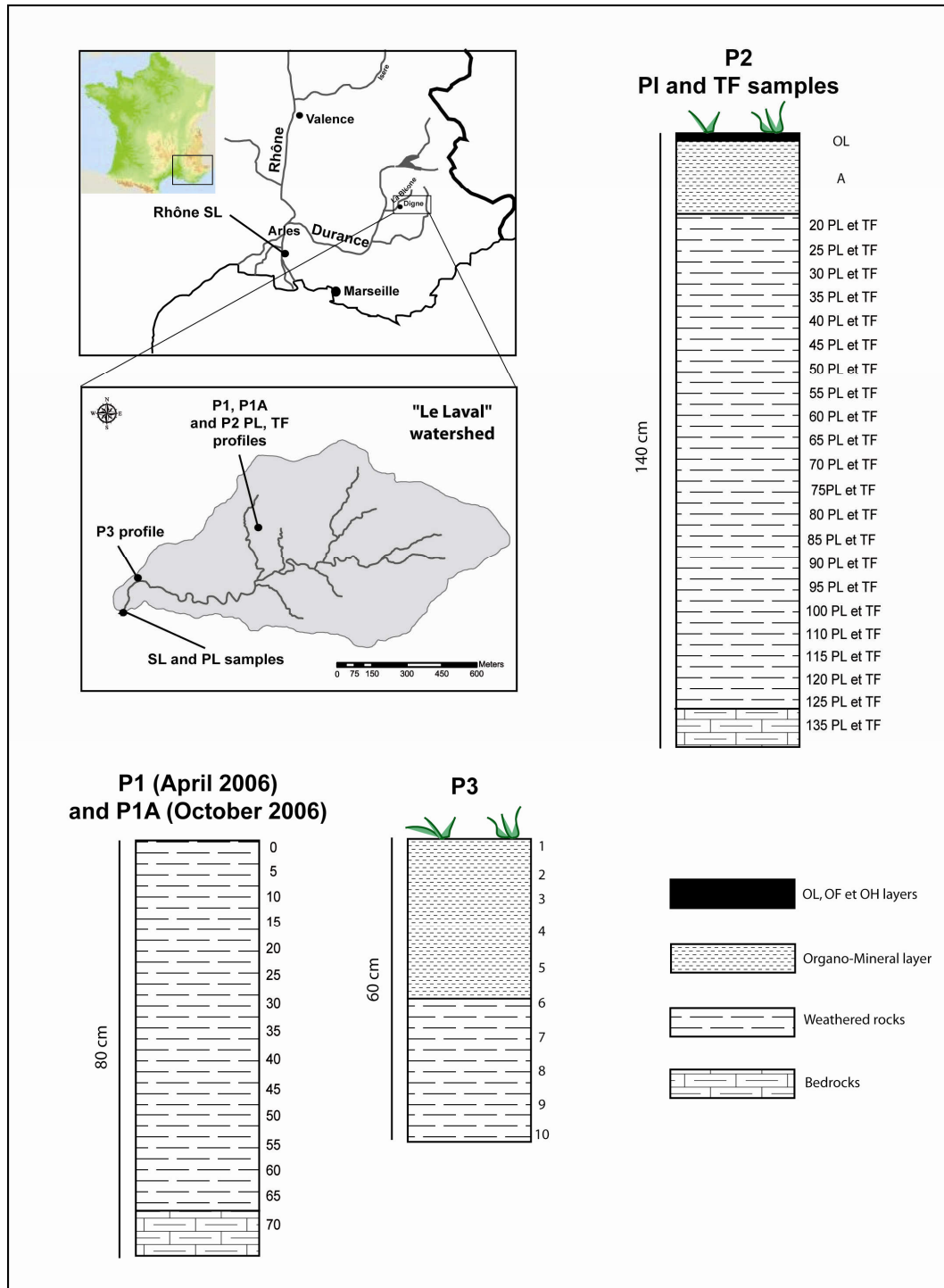


Figure IV-4: Geographical location of "Le Laval" watershed and samples localisation.

3 – Methods

3 – 1 - Chemical investigations

3-1-1 - Rock-Eval pyrolysis

Geochemical signature of samples was acquired with RE6 pyrolysis (Vinci Technologies®). Previously developed for the analyses of sedimentary rocks, this method has been now successfully tested for recent material (Di-Giovanni *et al.*, 1998 ; Noël, 2001 ; Disnar *et al.*, 2003 ; Sebag *et al.*, 2006).

Experimental protocol comprises two successive analytical stages performed with a temperature program of $30^{\circ}\text{C min}^{-1}$. The first one consists on a pyrolysis in oven of 100mg of crushed sample, Pyrolysis effluents are carried by nitrogen and hydrocarbons and oxygenate compounds yielded during a temperature range of 200-650°C are quantified. The second consists on oxidation in an oven and upon air, of the carbonaceous residue subjected to a temperature comprised between 400°C and 750°C (Espitalié *et al.*, 1985; Lafargue *et al.*, 1998, Behar *et al.*, 2001).

Parameters used in the present study are as follow: i) Tmax (°C) is the temperature at which the release maximal amount of hydrocarbons occur, ii) Hydrogen Index (HI, mg HC g⁻¹TOC), is an indicator of the richness of hydrogen of pyrolysed sample. Amount of Total Organic Carbon (TOC, %) is equal to the sum of pyrolysed organic carbon plus residual organic carbon provided by oxidation stage.

3-1-2 - ICP analysis

After loss on ignition measurement, samples are submitted to ICP (Inductively Coupled Plasma Emission spectrometry, Jobin-Yvon ULTIMA spectrometer) to obtain SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O and P₂O₅ content.

3 – 2 - Microscopic investigations

Palynofacies method, initially introduced by Combaz (1964), consists on organic concentrate obtained after successive acid attacks (HCl, and HF) to dissolve carbonates and silicates. The concentrate is then mounted as slides and observed using a photonic microscope under transmitted light. According to different criteria (shape, colour, texture) different classes of organic particles can be defined (Combaz, 1980, Tyson, 1995, Sebag, 2005, 2006, Comont et al., 2006).

Samples have been prepared using the following procedure. Dried samples (average 1 gram) have been submitted 1) to cold HCL treatment (50 ml) for 30 minutes to destroy carbonates; 2) to HF treatment (50 ml) for 12 hours with a two hours catalyst to 50 °C to dissolve silicate minerals; 3) and to an other HCL treatment (50 ml) for 30 minutes in order to dissolve chloride and fluoride which can be form during the previous treatments. 5) We have taken a part of obtain organic solution (between 10 and 30 %) to which we add a known mass of standard. Cupressus pollen was chosen as standard because of its strong reaction under UV excitation that helps greatly to its identification. 6) Final solution is then mounted as slides and analysed with a 50 x objective. The surfaces of the main categories were counted through a grid reticule, used as surface unit, and placed on the microscope ocular. 500 items per sample were counted.

For studied samples, mass concentration of each kind of particle is obtained thus presented:

$$\text{Particles (mg)} = \frac{\text{Mass standars added (mg)} \times \text{Particles area (\%)}}{\text{Standard area (\%)}} \times \frac{\text{Particles density}}{\text{Standard density}}$$

and

$$\text{Particles mass concentration (mg/g sample)} = \frac{\text{Particles (mg)}}{\text{Initial sample mass (mg)}}$$

4 – Results

4-1- Quantitative palynofacies investigation

4-1-1- Particles description

12 categories of organic particles were identified in studied samples (figure IV-5):

1) - Clear and Granular Amorphous Organic Matter (CGAOM), 2) - Reddish amorphous organic matter (RAOM) ; 3) - Dark Degraded Ligno-Cellulosic fragments (DDLCL) ; 4) - Translucent Ligno-Cellulosic fragments (TLC), 5) – Gelified Ligno-Cellulosic fragments (GLC), 6) - Gelified Amorphous Organic Matter (GA), 7) - Gelified Debris (GD), 8) - Dark Gelified Debris (OGD), 9) - Mycelium fragments (Myc), 10)- Cuticular fragments (Cut), 11) - Spore and Pollens (SP), 12) - Opaque Ligno-Cellulosic fragments (OLC) fragments that do not display any identifiable structure as well as any fluorescence under UV excitation. These particles are separated by their shapes (elongated - el OLC, squat - sq OLC, complex - c OLC, concave conc OLC).

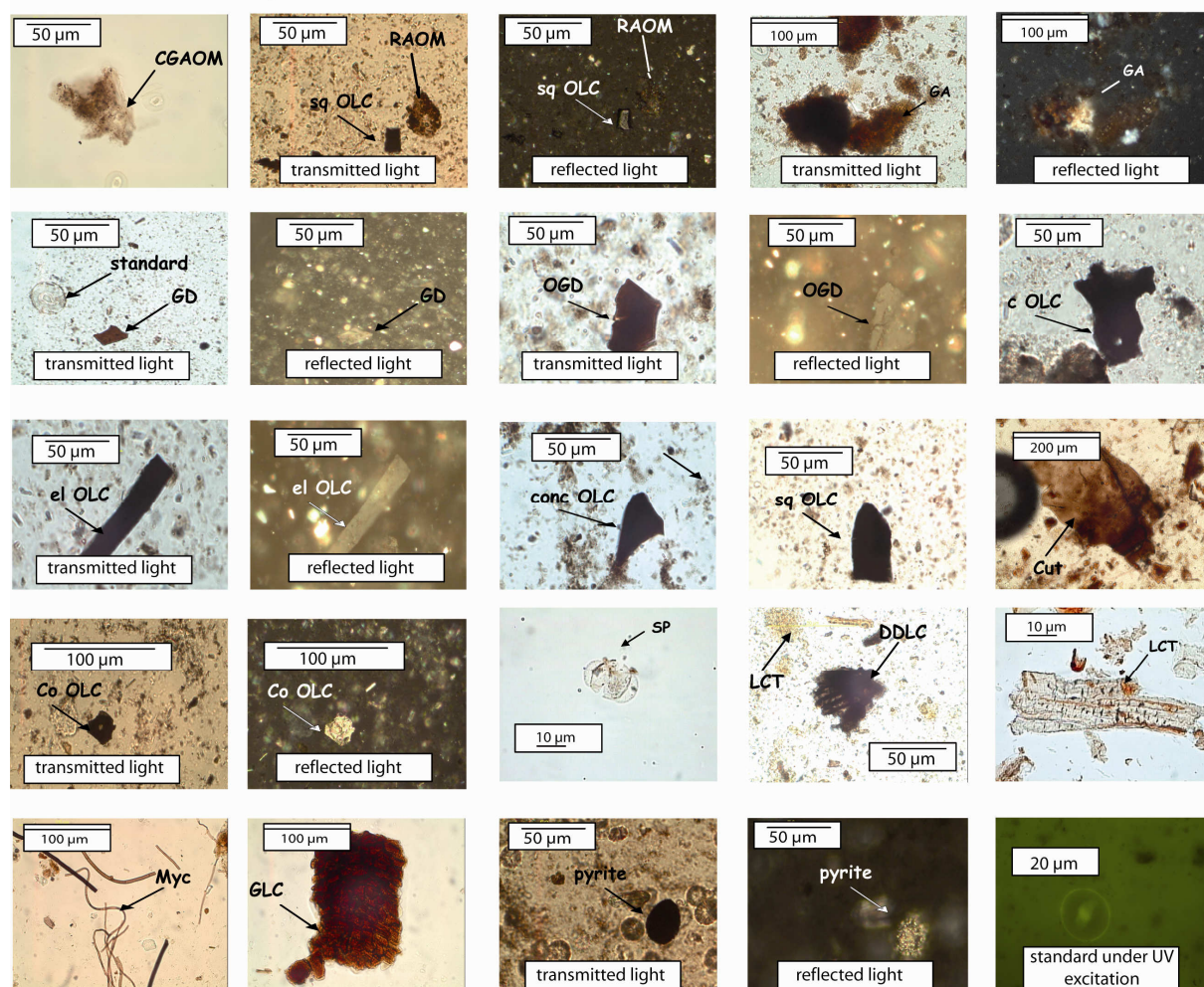


Figure IV-5: Categories of particulate organic matter distinguished by their morphological criteria: Clear and Granular Amorphous Organic Matter (CGAOM), - Reddish amorphous organic matter (RAOM), - Gelified Amorphous Organic Matter (GA), - Gelified Debris (GD), - Dark Gelified Debris (OGD), Opaque Ligno-Cellulosic fragments (OLC) fragments that do not display any identifiable structure as well as any fluorescence under UV excitation. These particles are separated by their shapes (elongated - el OLC, squat - sq OLC, complex - c OLC, concave conc OLC), - Cuticular fragments (Cut), - Spore and Pollens (SP), - Dark Degraded Ligno-Cellulosic fragments (DDLC) ; - Translucent Ligno-Cellulosic fragments (LCT), - Mycelium fragments (Myc), - Gelified Ligno-Cellulosic fragments (GLC), Pyrite.

4-1-2 -Particles density

Particles densities are measured using dense liquors (ethanol, water and bromoforme) with various densities (0.8, 1, 1.3, 1.5, 1.7 and 1.9). Two samples have been tested: a bed rocks organic concentrate located at the bottom of the P2 profile and a OH layer located at the top of the same profile. Microscopy observations and COT (Rock-Eval pyrolysis) of each density fraction allow classing the different particles.

For each density fraction:

$$\text{Particlessorganiccarbon (mg)} = \text{fraction weight} \times \text{TOC} \times \text{particlearea}(\%)$$

We will only present the particles organic carbon weights recuperate for each density fraction (figure IV-6).

OH sample mainly (figure IV-6a) consist of lignocellulosic fragments, AG, mbr and myc particles. RAOM, all OLC, fus, GD and pyrite particles are very slightly present or missed.

CGAOM mostly occur in the less dense fractions (above or equal at 1), and maximum material is collected in suspension at the density of 1 (15.75 mg). DDLC particles are mostly collected between 1.3 and 1.5 (15.3 mg), and TLC, GLC, myc and cut are mostly collected between 0.8 and 1 (respectively 37.3, 103.4, 13.1 and 8.2 mg). GA particles have a more complex distribution with two maximum, between 0.8 and 1 (59.6 mg) and between 1.3 and 1.5 (102.4 mg). This discrepancy can be explained in two ways: 1) – a possible confusion between particles (GA with GDLC), or 2) - the existence of several types of AG hardly distinguishable by this method. SP particles are slightly present and are collected in all densities fractions.

PL samples (figure IV-6b) mainly consist of OLC, OGD and ROAM particles. These particles appear to be denser than those of the OH sample and none remains in suspension at the density of 1. ROAM are mostly collected in the two fractions equal or below 1.3 (8.3 and 10.7 mg) and in suspension at a density of 1.5 (21.2mg). el OLC are mostly collected between 1.3 and 1.5 (2.4 mg); sq OLC are mostly collected in two fractions, below 1.3 (4.9 mg) and between 1.5 and 1.7 (11 mg); c OLC are collected between 1.7 and 1.9 (1.96 mg) and conc OLC are collected in all fractions, with a slight predominance between 1.5 and 1.7 (1.1 mg) and between 1.7 and 1.9 (0.8mg). GD particles are poorly present and are collected in all

fractions between 1 and 1.5 with a slightly predominance in fraction equal or below 1.3 (0.47 and 0.6 mg), and OGD mostly present in fraction equal or below 1.3 (9 and 13.8 mg). Co-OLC particles are present in the densest fractions above 1.7 (1.5 mg) and above 1.9 (1.4mg). Pyrite is too dense (5) to be found in these fractions and is poorly collected in studied samples. As GA particles in OH sample, sq OLC seem to be found preferentially in more than one density fraction and this discrepancy can be explained in two ways: 1) – a confusion between particles (OLC with OGD), or 2) - the existence of several types of OLC hardly distinguishable by this method. Cupressus sample are also been submitted to density measurement and remains suspended at the density of 1.3. All these results allow us to assign an approximate density for each type of particle (figure IV-6c).

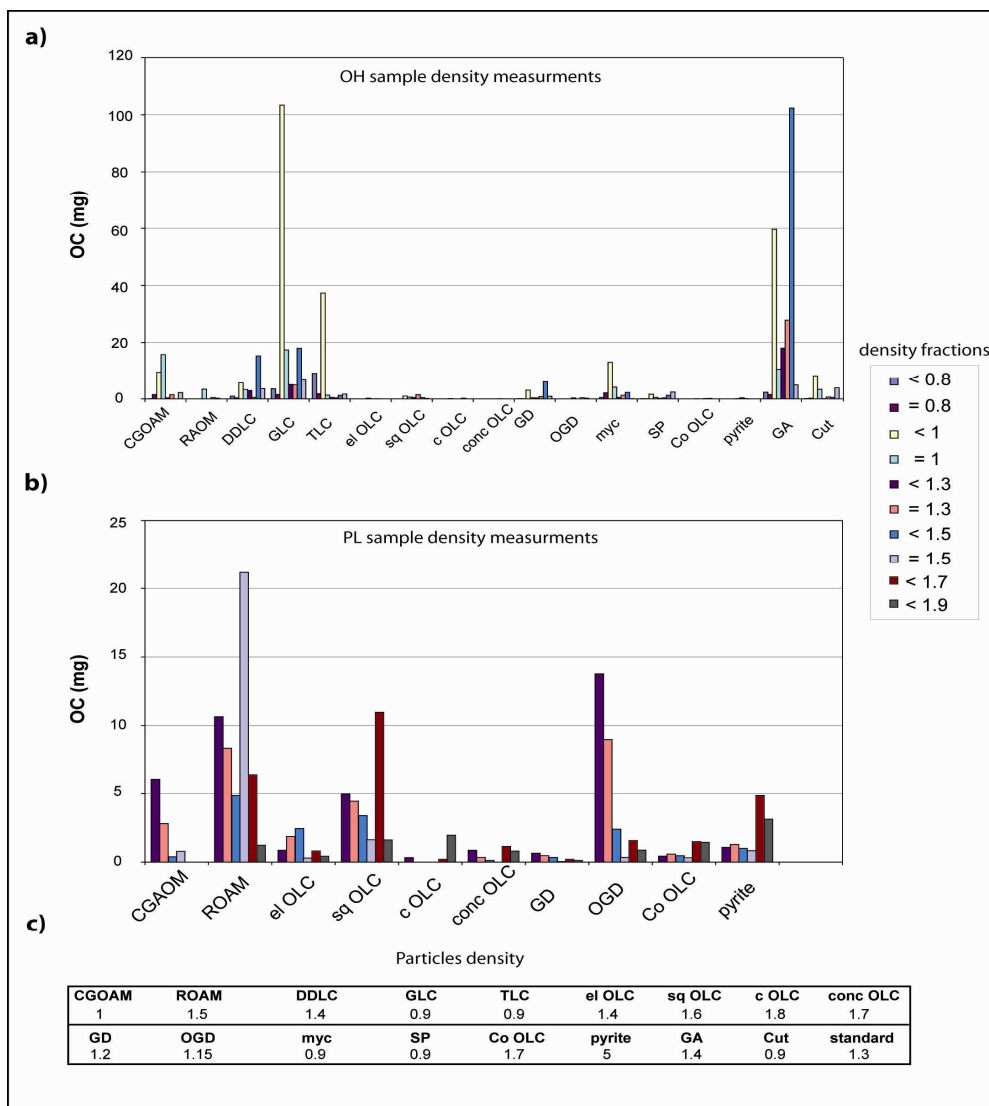


Figure IV-6: Organic particles measurement.

- a) particles organic carbon in different density fractions (OH sample),
 b) particles organic carbon in different density fractions (PL sample),
 c) particles density.

4-1-3 Quantification of samples organic particles

Some particles (Myc and Sp as example) are poorly present and others evolve without tendencies (as OLC particles) in the studied profiles. To increase results and figures readability, we directly group particles according to their optical properties: all OLC, all Ligno-Cellulosic fragments (as LC), GD with OGD (as GDgr), and Myc, mbr and SP as figurate elements.

P1 weathering profile organic content (figure IV-7a) is homogeneous and samples reveal a strong predominance of OLC (between 0.176 and 0.296 mg/g), RAOM (between 0.109 and 0.192 mg/g) and GDgr (0.061 and 0.113 mg/g); only pyrite presents a significative evolution along the profile and their proportions decrease from bottom to surface (from 0.268 to 0.034 mg/g). P1A samples present similar organic content with mass concentration varying from 0.215 to 0.310 mg/g for OLC, 0.118 and 0.188 mg/g for RAOM and 0.058 and 0.122 mg/g for GDgr. Pyrite concentrations do not exceed miss or is slightly present in these samples and reach only 0.08mg/g.

P2 Pl organic content (figure IV-7b) also mainly consists of OLC, RAOM and GDgr. Maximum concentrations are obtained between 110 and 125 cm depth (OLC and RAOM concentrations can reach 0.512 and 0.317mg/g. Pyrite is observed in overall samples. Instead great variability of obtained values, one can note a decrease from bottom to surface, with concentration dropping by about 0.219 to about 0.015 mg/g. P2 A sample presents lowest OLC, RAOM and GDgr concentrations, (respectively 0.163, 0.132 and 0.070 mg/g) and contain different kind of particles, notably LC (0.543 mg/g) and GA (0.664 mg/g). Pyrite misses in P2 A sample. Quantitative palynofacies has not been applied to samples OL and OH because standard surface is insufficient to reflect large and low altered recent organic material; we then present classical (qualitative) palynofacies results for these samples. OL sample mainly contain LC (52.3 %), principally LCT and GLC, whereas CGAOM, GA and mbr represent respectively 20.3, 9.3 and 18.1 %. OH sample contain mainly LC particles (46.9 % principally GLC) and GA (35 %), whereas CGAOM, and figurate elements represent respectively 6.8 and 9.5 %. Other organic particles and pyrite miss or slightly occur.

P2 TF (figure IV-7b) samples possess an intermediate organic content between PL and A samples. OLC, GCgr and concentrations RAOM (respectively between 0.164 and 0.500 mg/g; between 0.044 and 0.184 mg/g and between 0.091 and 0.314 mg/g) are the same order as in PL samples, with a maximum between 110 and 125 cm depth (OLC, GDgr and RAOM

concentrations can reach 0.500, 0.184 and 0.314mg/g). First samples (between 20 and 40 cm depth) are generally low in OLC, RAOM and GDgr particles with concentrations limited to 0.192 mg/g, 0.134 mg/g and 0.55 mg/g. Pyrite misses or is slightly present in TF samples. Other particles occurrence decrease with the depth and evolve from 0.5 to 0.01 mg/g for LC (principally GLC), from 0.422 to about 0.18 mg/g for AG. CGAOM and figurate elements are poorly present and concentrations decrease with the depth too.

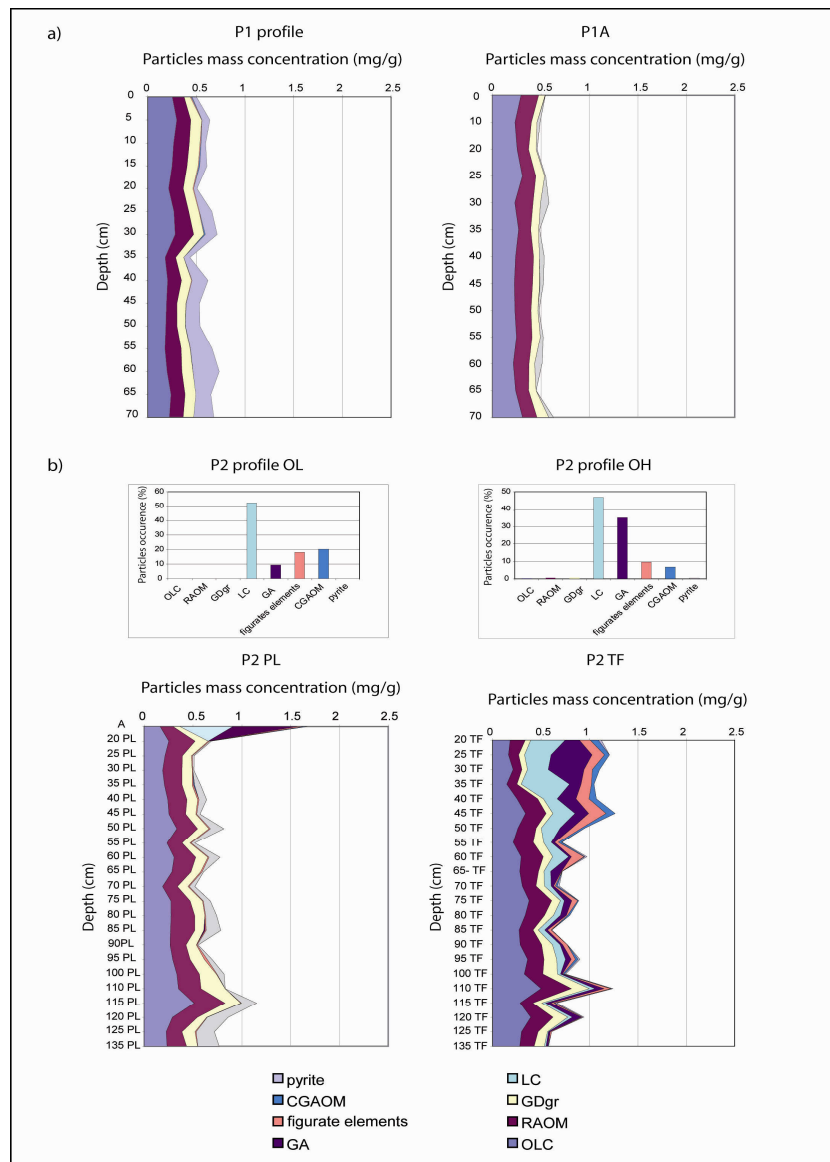


Figure IV-7: Quantitative palynofacies counting.
 a) P1 and P1A profiles, b) P2 profile (PL, TF and samples).

P3 samples (figure III-8a) contain the same organic particles as A and TF samples and pyrite misses or is slightly present. OLC, RAOM and GDgr concentrations respectively vary between 0.116 and 0.200 mg/g, between 0.041 and 0.105 mg/g, and between 0.054 and 0.196 mg/g. Others particles decrease with the depth and concentrations respectively fall from 1.415 to 0.018 mg/g for LC, from 0.531 to 0.021 for GA, from 0.122 to 0.007 mg/g for figurate elements and from 0.167 to 0.005 for CGAOM.

“Le laval” SL and BL samples organic content (figure IV-8a) mainly consist of OLC (between 0.221 and 0.403 mg/g), RAOM (between 0.195 and 0.297 mg/g), GDgr (between 0.042 and 0.070 mg/g) and pyrite (between 0.033 and 0.328 mg/g), with concentrations little higher than in P1 and P2 PL profiles samples. LC, GA, figurate elements and CGAOM are slightly present and the sum of these particles evolves between 0.053 and 0.125 mg/g. The Bouinenc and Bléone BL samples exhibits the same organic content, but OLC, GDgr and RAOM particles are less concentrated in the Bouinenc sample (factor 1.5) and in Bléone sample (factor 2.5). In these ones, we can observe an other kind of dark amorphous organic particle (OAOM) that respectively reach 0.042 and 0.056 mg/g. Rhône river SL organic content (figure IV-8c) differs from previous ones with higher of LC, GA, figurate elements and CGAOM concentrations. OAOM particles are also observed in these samples. We separate Co OLC (0.273 mg/g) in this sample because of possible confusion with burned particles coming from human activity in the Rhône river watershed.

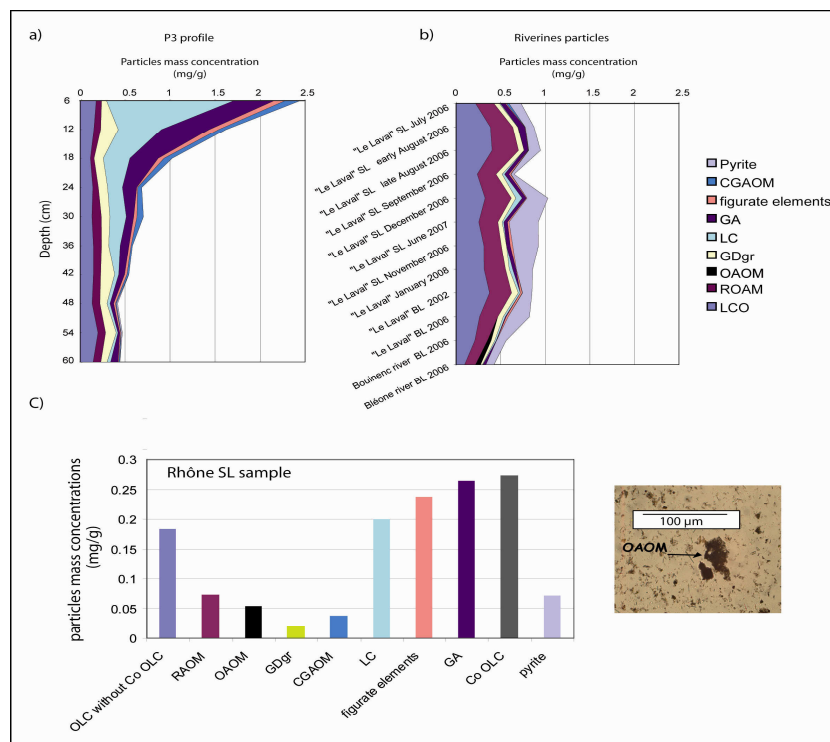


Figure IV-8: Quantitative palynofacies counting.

a) P3 profile, b) riverine particles (SL and BL samples), c) Rhône SL sample.

4-2 - Chemical investigation

4-2-1) Rock-Eval analysis

P1 profile samples (figure IV-9) are homogeneous and exhibit small TOC values (between 0.3 and 0.52 %), low HI values (between 11 and 22 mg HC.g⁻¹TOC) and a Tmax close to 520°C. P1A samples (figure IV-9) present similar values than those obtain for the P1 samples.

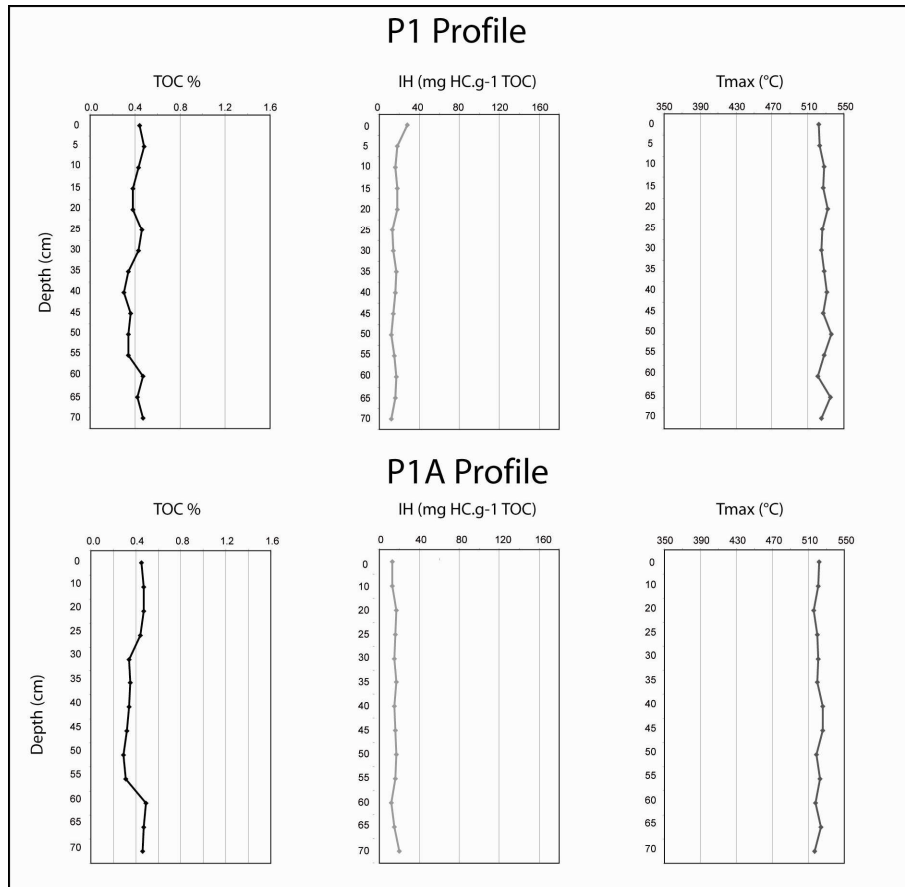


Figure IV-9: TOC (%), IH and Tmax evolutions along P1 and P1A profiles.

P2 PL samples (figure IV-10a) show very similar values, except for the samples taken between 110 and 125 cm depth, which have more important TOC (between 0.62 and 0.69 %). P2 TF samples (figure IV-10b) present more contrasted values. TOC and the HI decrease with depth (1.13 to 0.49 % and 128 to 14 mg HC.g⁻¹TOC) and Tmax increase in the deepest samples (from 400 to 520°C). Soils samples exhibit different values. Indeed OL and OH samples are characterised by high TOC (40.67, 25.55 %), high HI (446 and 309 mg HC.g⁻¹

^1TOC) and small Tmax values (336 and 330°C). P2 A sample exhibits intermediate TOC, HI and Tmax values, respectively 1.46 % and 164 mg HC.g ^{-1}TOC and 410°C.

P3 profile (figure IV-10c) samples TOC decrease with depth before being stabilized at 36 cm (from 1.73 to approximately 0.3 %). Tmax and HI also decrease with the depth (400°C to 215°C and 180 to 63 mg HC.g ^{-1}TOC).

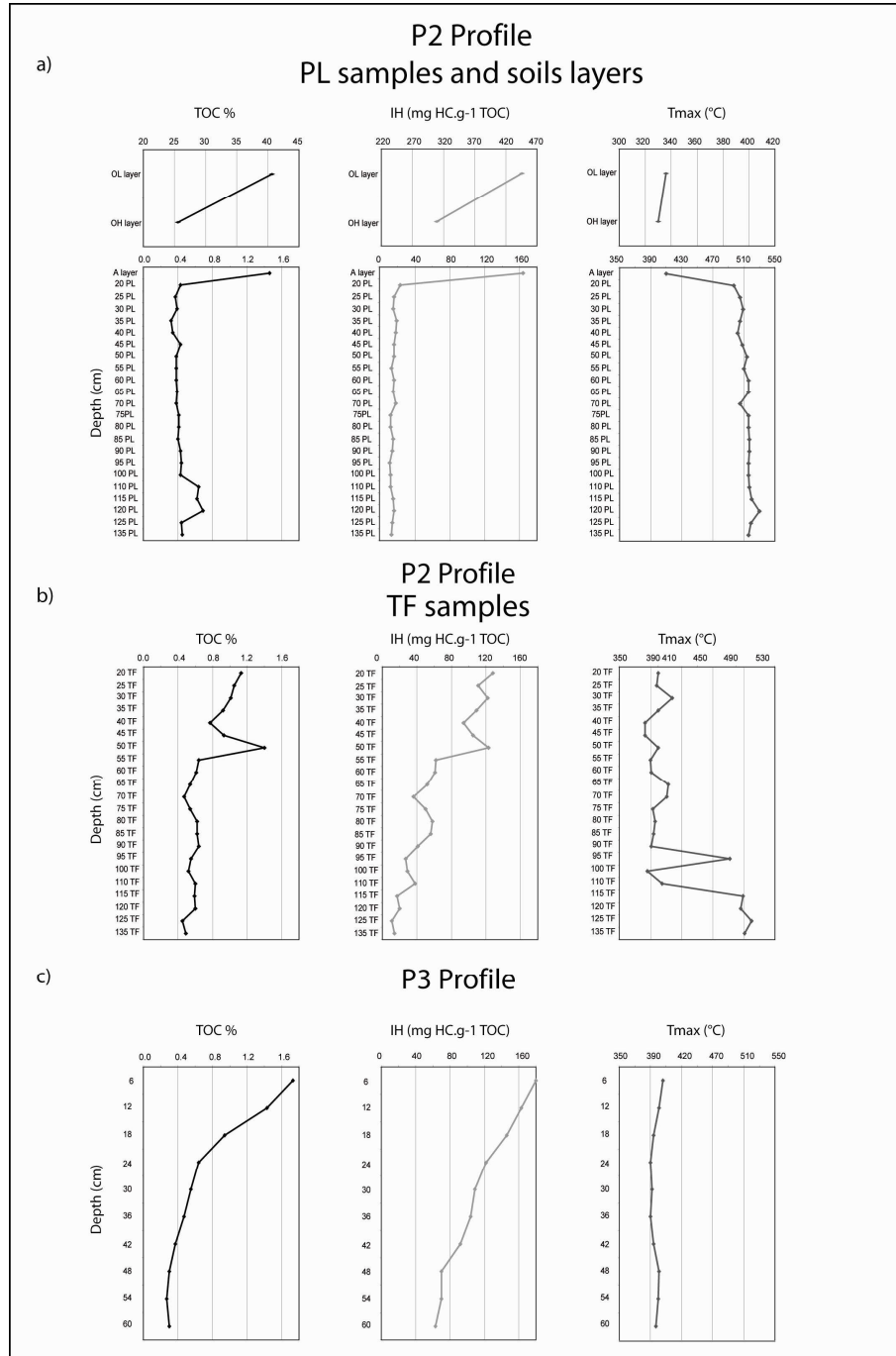


Figure IV-10: TOC (%), IH and Tmax evolutions along P2 PL profile (a), P2 TF profile, and (c) P3 profile.

Riverine particles (figure IV-11) present similar values to those obtained in PL samples. Whatever the sampling month, “le laval” SL and BL samples exhibits small TOC (between 0.48 and 0.62 %), low HI (between 11 and 29 mg HC.g⁻¹TOC) and Tmax close to 520°C (except “le laval” 2006 BL samples, which have higher Tmax). The Bouinenc, Bléone rivers BL samples exhibits lower TOC values (respectively 0.38, 0.28 and 1.07 %), low HI (11, 18 and HC.g⁻¹TOC), and lower Tmax (462, 446°C). Rhône SL sample exhibit higher TOC (1.07 %), HI (144 HC.g⁻¹TOC) and lower Tmax (420°C).

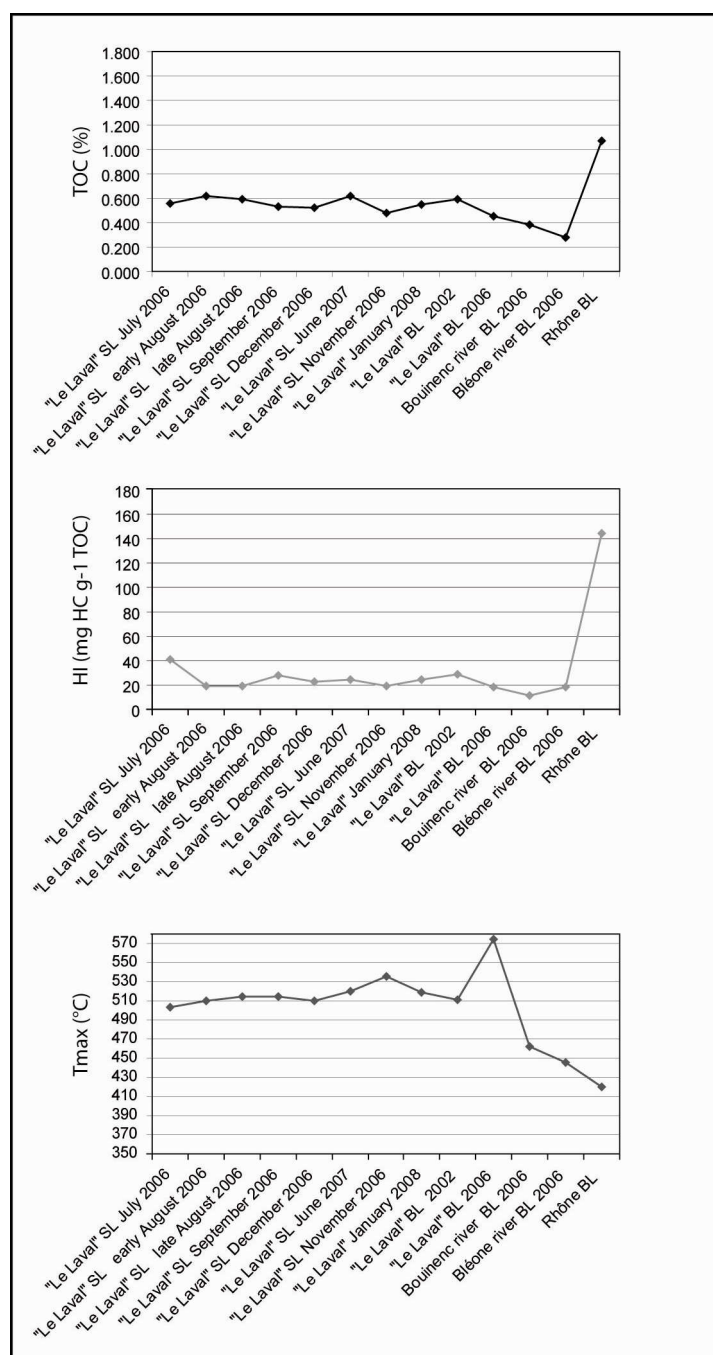


Figure IV-11: TOC (%), IH and Tmax, riverine particles (SL, and BL samples).

4-2-2- ICP investigation

ICP analyses are presented in table IV-2.

All samples mineral contents mainly consist of SiO_2 (between 24 and 47 %), Al_2O_3 (between 13 and 17.5 %), loss on ignition (between 13.54 and 22.88 %) and CaO (between 10 and 22 %). Other elements are less concentrated and only Fe_2O_3 reach 5 %.

Al_2O_3 and SiO_2 contents decrease along P1 profile with the depth (from 15.5 to 12.5 % sample for Al_2O_3 and from about 45 % to 35 % for SiO_2). On the other hand, CaO and loss on ignition increase with depth, respectively from 13.5 % to 20 % and from 16.45 % to 20.6 %. Fe_2O_3 remain constant along the profile, with values averaging 5.4 %. P1A samples present similar values, but different trends: Al_2O_3 % (between 12.35 and 16.79 %), SiO_2 (between 34.63 and 45.71 %) present a minimum between 50 and 65 cm depth and inversely, loss on ignition (between 15.38 and 21 %) and CaO (between 12.22 and 20.17 %) present a maximum at this level. Fe_2O_3 remain constant along the profile, with values averaging 5.25%.

All components remain constant along P2 PL profile with Al_2O_3 % evolving between 14 and 17.52 %, SiO_2 between 37 and 47 %, CaO between 10.96 and 20.01 %, loss on ignition between 14.2 and 17.28 % and Fe_2O_3 average 5.1 %. P2 A layer sample presents the lowest CaO value. P2 TF samples are little different with weak Al_2O_3 content and more concentrate CaO, loss on ignition and Fe_2O_3 .

P3 samples present more contrasted values: Al_2O_3 % evolving between 13.06 and 14.95 %, SiO_2 between 34.28 and 40.65 %, CaO between 15.62 and 22.14 %, loss on ignition between 17.9 and 22.88 % and Fe_2O_3 average 5.28 %. One can note that between 12 and 18 cm depth occur the higher values in SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 and the lowest value in CaO and loss on ignition.

SL samples present values close to those measured in weathering profiles, elements concentration average 14.9 % for Al_2O_3 , 39.4% for SiO_2 , 16.54 % for CaO, 18 % for loss on ignition and 5.41 % for Fe_2O_3 .

Chapitre IV : Comportement de la MOF face aux altérations supergènes

P1 profile	SiO2 %	TiO2 %	Al2O3 %	Fe2O3 %	MnO %	MgO %	CaO %	Na2O %	K2O %	P2O5 %	loss on ignition %
P1 0	43.950	0.740	15.610	4.980	0.060	1.320	13.594	0.610	2.700	0.190	16.450
P1 5	44.670	0.750	15.700	6.020	0.060	1.350	13.437	0.640	2.810	0.290	16.180
P1 10	44.140	0.730	15.610	5.510	0.070	1.340	13.801	0.630	2.740	0.180	16.330
P1 15	45.670	0.770	15.320	5.230	0.060	1.330	13.319	0.640	2.700	0.180	16.560
P1 20	44.740	0.750	15.630	5.410	0.050	1.300	12.905	0.620	2.700	0.170	15.270
P1 25	44.730	0.740	15.720	6.060	0.070	1.350	13.722	0.640	2.790	0.240	15.320
P1 30	44.410	0.730	15.760	5.760	0.070	1.360	14.066	0.640	2.730	0.170	15.730
P1 35	40.380	0.660	14.170	5.610	0.070	1.320	16.476	0.590	2.460	0.150	17.750
P1 40	39.990	0.660	14.700	5.370	0.070	1.300	16.466	0.610	2.480	0.180	17.550
P1 45	40.970	0.670	15.330	5.160	0.070	1.300	15.158	0.600	2.520	0.150	17.150
P1 50	40.540	0.660	14.980	6.400	0.080	1.300	15.276	0.600	2.460	0.160	16.880
P1 55	38.290	0.620	13.900	5.690	0.080	1.300	17.361	0.590	2.260	0.160	18.350
P1 60	40.060	0.660	14.810	5.330	0.070	1.310	16.653	0.610	2.450	0.190	18.040
P1 65	37.350	0.610	12.930	4.300	0.090	1.220	19.614	0.550	2.160	0.210	19.940
P1 70	35.795	0.550	12.315	5.030	0.090	1.255	20.253	0.550	1.965	0.210	20.690
P1A profile	SiO2 %	TiO2 %	Al2O3 %	Fe2O3 %	MnO %	MgO %	CaO %	Na2O %	K2O %	P2O5 %	loss on ignition %
P1A 0	45.71	0.79	16.55	5.18	0.05	1.38	12.24	0.43	2.44	0.06	15.38
P1A 10	43.62	0.74	16.53	5.58	0.06	1.37	12.79	0.41	2.48	0.05	15.8
P1A 20	44.07	0.74	16.79	5.61	0.06	1.38	13.11	0.44	2.51	0.04	15.98
P1A 25	44.71	0.78	16.79	5.41	0.05	1.35	12.22	0.43	2.52	0.01	15.53
P1A 30	43.56	0.75	16.43	5.14	0.06	1.35	12.76	0.42	2.44	0.00	16.17
P1A 35	43.54	0.75	16.60	5.19	0.06	1.34	13.17	0.43	2.46	0.01	15.85
P1A 40	41.71	0.71	15.77	5.26	0.06	1.32	14.36	0.41	2.43	0.02	17.92
P1A 45	38.80	0.65	14.39	5.43	0.07	1.27	16.21	0.38	2.18	0.02	18.33
P1A 50	37.04	0.59	13.31	5.48	0.09	1.33	19.21	0.38	2.03	0.02	20.24
P1A 55	34.63	0.56	12.35	4.97	0.09	1.28	20.17	0.35	1.86	0.02	21
P1A 60	35.62	0.57	12.63	5.14	0.09	1.25	19.50	0.37	1.93	0.08	20.5
P1A 65	43.33	0.74	16.29	5.21	0.06	1.36	13.53	0.44	2.52	0.05	15.65
P1A 70	42.46	0.71	15.55	4.48	0.05	1.33	12.63	0.42	2.41	0.15	15.54
P2 profile	SiO2 %	TiO2 %	Al2O3 %	Fe2O3 %	MnO %	MgO %	CaO %	Na2O %	K2O %	P2O5 %	loss on ignition %
A layer	42.441	0.698	16.314	5.562	0.073	1.246	10.956	0.479	2.595	0.169	19.520
P2 PL 20	42.533	0.687	16.534	5.431	0.055	1.312	12.259	0.457	2.562	0.126	17.280
P2 PL 25	43.708	0.696	16.721	5.060	0.055	1.308	11.628	0.502	2.647	0.083	16.680
P2 PL 30	45.690	0.740	17.410	5.410	0.050	1.560	11.180	0.520	2.730	<=0,1	16.640
P2 PL 35	43.689	0.701	16.654	5.415	0.055	1.283	12.757	0.510	2.658	<=0,1	17.080
P2 PL 40	40.620	0.620	14.180	5.630	0.080	1.390	16.780	0.510	2.270	<=0,1	19.300
P2 PL 45	41.320	0.660	14.730	4.730	0.060	1.320	15.140	0.530	2.400	<=0,1	18.820
P2 PL 50	42.670	0.690	15.904	4.964	0.055	1.226	13.342	0.510	2.660	<=0,1	17.380
P2 PL 55	40.824	0.645	14.919	4.932	0.073	1.169	16.221	0.481	2.456	0.110	18.580
P2 PL 60	43.472	0.700	16.127	5.134	0.073	1.222	13.388	0.533	2.683	0.328	16.920
P2 PL 65	43.260	0.690	15.940	5.430	0.060	1.410	13.410	0.520	2.650	<=0,1	17.440
P2 PL 70	43.870	0.710	16.290	5.060	0.060	1.440	12.980	0.540	2.750	<=0,1	16.600
P2 PL 75	44.490	0.720	16.440	4.740	0.050	1.480	12.220	0.570	2.800	<=0,1	16.380
P2 PL 80	44.270	0.740	16.820	5.150	0.050	1.530	11.910	0.560	2.860	<=0,1	16.740
P2 PL 85	43.350	0.720	16.490	5.250	0.060	1.530	12.620	0.540	2.740	<=0,1	16.800
P2 PL 90	37.030	0.621	13.999	3.854	0.073	1.054	20.008	0.459	2.228	<=0,1	20.840
P2 PL 95	45.434	0.761	15.816	5.054	0.055	1.137	13.590	0.534	2.706	0.163	14.770
P2 PL 100	43.410	0.720	14.510	4.380	0.060	1.250	16.180	0.550	2.520	<=0,1	16.460
P2 PL 110	47.295	0.817	16.505	5.347	0.055	1.237	11.871	0.579	2.799	0.189	14.210
P2 PL 115	45.855	0.789	16.698	4.990	0.036	1.258	12.716	0.564	2.729	0.135	14.570
P2 PL 120	47.260	0.830	17.520	5.690	0.040	1.490	10.420	0.600	3.030	<=0,1	13.540
P2 PL 125	43.400	0.750	15.720	5.140	0.060	1.390	14.150	0.560	2.680	<=0,1	16.410
P2 PL 135	40.190	0.670	13.750	4.750	0.050	1.290	16.790	0.830	2.540	<=0,1	18.360
P2 TF 20	42.172	0.690	14.811	5.378	0.050	1.041	12.789	0.460	2.500	0.120	16.990
P2 TF 25	43.405	0.710	15.111	5.232	0.050	1.079	12.591	0.470	2.520	0.060	16.440
P2 TF 30	42.732	0.700	15.393	5.974	0.060	1.079	13.107	0.450	2.430	0.040	16.860
P2 TF 35	43.815	0.710	15.771	5.404	0.060	1.132	12.796	0.480	2.540	0.060	17.230
P2 TF 40	41.452	0.650	14.242	5.935	0.060	1.089	15.959	0.430	2.210	0.100	17.920
P2 TF 45	39.096	0.600	13.094	5.413	0.070	1.065	16.800	0.420	2.070	0.140	20.180
P2 TF 50	40.216	0.620	13.060	5.375	0.070	1.027	17.486	0.430	2.080	0.070	20.100
P2 TF 55	42.259	0.660	14.040	5.539	0.070	1.079	16.064	0.450	2.260	0.070	18.830
P2 TF 60	42.736	0.650	13.913	5.678	0.070	1.077	16.218	0.440	2.220	0.060	18.770
P2 TF 65	39.730	0.610	13.431	4.298	0.070	1.070	14.366	0.390	2.100	0.030	18.310
P2 TF 70	42.015	0.640	13.897	5.712	0.080	1.071	15.651	0.450	2.320	0.080	18.810
P2 TF 75	40.772	0.650	14.635	5.843	0.070	1.192	13.747	0.440	2.320	0.080	17.250
P2 TF 80	40.742	0.680	14.939	5.702	0.060	1.202	14.148	0.440	2.280	0.040	18.700
P2 TF 85	43.319	0.700	14.912	5.220	0.060	1.131	14.180	0.470	2.320	0.060	16.920
P2 TF 90	45.042	0.750	15.418	4.957	0.060	1.195	13.034	0.510	2.440	0.060	16.660
P2 TF 95	43.829	0.740	15.068	5.131	0.070	1.193	13.540	0.480	2.400	0.060	16.630
P2 TF 100	43.628	0.730	14.744	5.411	0.070	1.150	13.946	0.490	2.340	0.030	17.290
P2 TF 110	43.761	0.710	14.697	6.097	0.100	1.173	13.230	0.460	2.360	0.020	16.930
P2 TF 115	44.653	0.760	15.655	5.422	0.120	1.243	11.892	0.490	2.490	0.010	15.760
P2 TF 120	46.077	0.790	16.198	5.739	0.100	1.291	11.635	0.520	2.660	0.060	15.180
P2 TF 125	41.859	0.690	14.649	5.772	0.070	1.228	14.557	0.450	2.340	0.010	17.310
P2 TF 135	39.765	0.650	13.923	5.352	0.060	1.171	15.802	0.470	2.230	0.070	18.280
P3 profil	SiO2 %	TiO2 %	Al2O3 %	Fe2O3 %	MnO %	MgO %	CaO %	Na2O %	K2O %	P2O5 %	loss on ignition %
P3 6	36.950	0.610	13.400	5.120	0.220	1.090	18.840	0.370	2.240	<=0,1	22.880
P3 12	40.322	0.691	14.949	5.993	0.255	1.056	15.685	0.453	2.425	0.269	17.900
P3 18	40.650	0.680	14.850	5.850	0.240	1.200	15.620	0.400	2.410	0.110	18.450
P3 24	37.820	0.640	14.010	5.580	0.220	1.130	17.900	0.410	2.290	0.110	19.400
P3 30	37.480	0.630	13.960	5.280	0.210	1.160	18.450	0.410	2.330	0.110	20.320
P3 36	36.900	0.630	13.690	5.120	0.200	1.160	19.460	0.400	2.330	0.110	20.240
P3 42	35.260	0.600	13.190	4.980	0.190	1.130	19.960	0.390	2.250	0.100	21.040
P3 48	34.420	0.590	13.000	4.910	0.250	1.110	20.300	0.390	2.150	0.110	21.410
P3 54	34.680	0.600	13.110	4.820	0.210	1.130	21.250	0.400	2.190	0.100	21.290
P3 60	34.283	0.591	13.065	5.107	0.164	0.916	22.135	0.387	2.129	0.214	21.120
riverine particles	SiO2 %	TiO2 %	Al2O3 %	Fe2O3 %	MnO %	MgO %	CaO %	Na2O %	K2O %	P2O5 %	loss on ignition %
"Le Laval" SL July 2006	40.201	0.735	16.208	5.268	0.095	1.766	16.133	0.474	2.673	0.124	17.520
"Le Laval" SL early August 2006	38.356	0.701	15.156	5.077	0.093	1.685	16.113	0.480	2.584	0.121	18.680
"Le Laval" SL late August 2006	38.980	0.699	14.841	5.309	0.094	1.774	16.340	0.490	2.443	0.128	17.900
"Le Laval" SL September 2006	39.976	0.733	15.880	5.315	0.088	1.794	15.709	0.482	2.556	0.125	17.510
"Le Laval" SL December 2006	39.168	0.685	14.172	5.590	0.100	1.774	17.479	0.488	2.322	0.119	18.100
"Le Laval" SL June 2007	40.557	0.721	14.617	5.854	0.096	1.686	16.295	0.495	2.380	0.105	17.120
"Le Laval" SL November 2006	37.751	0.653	13.568	5.342	0.099	1.912	18.039	0.502	2.203	0.111	18.870
"Le Laval" January 2008	40.041	0.698	14.639	5.505	0.098	1.781	16.215	0.490	2.357	0.117	18.120

Table IV-2: Samples mineral contents.

5 – Discussion

5 –1 – Definition of fossil organic matter and recent organic matter

Samples were subjected to these analysis in the aim to distinguish fossil organic matter (FOM) contained in rocks and the recent organic matter (ROM) produced by the biomass in the whole studied compartments.

Litters and rocks samples have very different organic content with different TOC, HI and Tmax values. Indeed HI high values and Tmax low values are observed in litters while low HI and high Tmax values occur in bedrocks. Intermediate values obtained in potentially mixed layers such as A and TF ones can be interpreted as mixing of FOM and ROM or weathered ROM. For these reasons, Rock-Eval investigations cannot allow the definition of FOM or ROM markers in the studied samples.

Optical analysis of bedrocks samples shows a palynofacies mainly dominated by OLC, MOAR and GDgr that can respectively represent 95 % of the organic content. These particles are not found in the OL samples, witch is mainly dominated by LC, GA, figurate elements and CGAOM. With these results, we are able to discriminate and follow MOR and MOF along studied profiles.

5-2- Method validity

Quantitative palynofacies method allows to obtain organic matter mass percentage estimation. To test its validity, results were compared with TOC obtained by Rock-Eval analysis. Organic content of P1 and P2 PL samples mainly consists in FOM, and we obtain for these samples an organic matter / TOC ratio (OM / TOC) of 1.31 ± 0.21 ; which is consistent with proposed values for mature organic matter that has been submitted to a strong diagenesis (Rotaru *et al.*, 2006). Duchaufour (2001) proposed OM / TOC values varying from 1.7 to 2 for soil organic matter. Using theses OM / TOC values (1.3 for FOM and 1.7 for ROM) we have then calculated TOC values using quantitative palynofacies results and compared them to the ones obtained by Rock-Eval analysis. We note a difference between Rock-Eval TOC and calculated TOC that average $\pm 15.5 \%$ (figure IV-12). In detail, one can note that for high TOC ($> 0.9 \%$) we systematically underestimate TOC, and such error can be

explained by the fact that samples with high TOC contain larger ROM organic particles and used standard surface seems to be insufficient to really quantify ROM.

As a conclusion, quantitative palynofacies method is suitable for the study of FOM, with an error of 15 %. But another larger standard should be used to quantify larger organic particles.

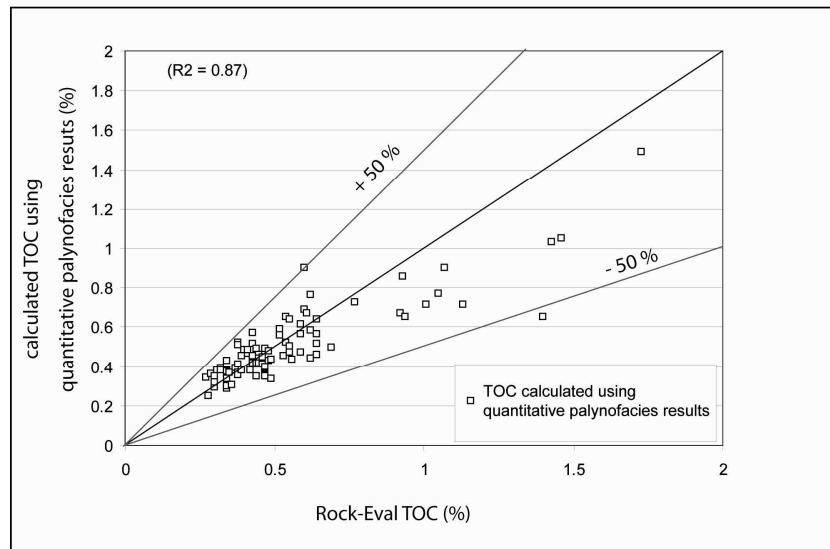


Figure IV-12: Correlation between TOC obtain by rock Eval analysis and TOC calculated with quantitative palynofacies results.

5 – 3 – Weathering characterisation and location in studied profiles.

Continental surfaces are subjected to two principal weathering processes, the (bio)chemical and the mechanical ones. For “le Laval” watershed, mechanical weathering corresponds to direct erosion (regressive erosion) of the marls by water streaming responsible for observed badlands morphology. Such erosion produces riverine particles exported by rivers (Mathys, 2006). Chemical weathering, responsible for the weathering profiles formation, corresponds to the hydrolysis of the marls due to seepage water (Campy and Macaire, 1989). In vegetalized context, biochemical processes occurs (bacterial activity) that permits soils formations.

ICP analysis allows to follow rock's degradation in the studied profiles. In order to precisely define weathering location, ICP results were normalised against Al_2O_3 contents because Al_2O_3 is known as to be resistant to alteration (Campy and Macaire, 1989) (table IV-3).

Bedrocks / weathering profiles transition:

P1 shows a strong decrease of $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and loss on ignition/ Al_2O_3 , from the bedrock to the surface (respectively 0.85 to 1.6 and 1.05 to 1.7) while $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ values appear relatively constant and close to 2.8. Such $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ disappearance could indicate a rock alteration (decarbonation), but study of the same profile sampled 6 months later (P1A) allows countering this hypothesis. Indeed the marls plaques inclination force a 15 cm gap between the two 2 profiles and we do not note an increase of $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ towards depth along P1A profile, but a maximum between 50 and 65 cm. After correction, we can notice in P1A profile a sensitive decline of elements contents/ Al_2O_3 , notably $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ with values dropping by about 1.16 in P1 to 0.97 in P1A samples.

In P2 PL profile, elements/ Al_2O_3 values vary much more: $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ values average 2.72 but $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and loss in ignition/ Al_2O_3 values respectively jointly vary from 0.6 to 1.43 and from 0.86 to 1.49. P2 Pl samples between 20 and 40 cm depth present the lowest values ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and loss on ignition/ Al_2O_3 values average 2.61, 0.71 and 1), but profile initial variability does not allow us to clearly identify significant weathering.

The study of a lonely weathering profile does not allow to identify chemical weathering impact on the mineralogical composition of the rocks. But the comparison of two profiles (P1 and P1A) allows highlighting a marls composition evolution that occurred during the 6 months interval between successive samplings.

Weathering profiles / A layers transition:

P2 A samples elements/ Al_2O_3 are of the same order than those measured underlying P2 Pl samples. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ value is 2.6 and $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ value is equal to 0.67. It is also difficult to identify weathering.

P3 profile weathered layers / A layers transition do not show real evolution of elements/ Al_2O_3 values. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ values average 2.69, and $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and loss on ignition/ Al_2O_3 values evolving respectively between 1.05 and 1.69, and between 1.2 and 1.71 are generally greater than in P2 profile. 12 and 18 cm samples present minimum $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ value averaging 1.05, and such variation can be either due from weathering processes impact on rock lithology, or to the initial heterogeneity of the rock.

Weathering profiles / TF transition:

Study of P2 TF profile shows that variations of elements/ Al_2O_3 values are the same as the ones observed in PL samples. That confirms the genetic relationship between PL and TF

samples at a same depth. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and loss on ignition/ Al_2O_3 values respectively average 2.9, 0.98 and 1.21. One can observe that $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ values observed in TF samples are higher than the ones observed in Pl. This fact can be explained by the weak $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ content in surface layers ($\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ average 0.68). Because of its solubility, this element seems to be the most mobile and can precipitate in depth layers. PL / TF transition is marked by a rock composition evolution, but we must admit that possible migration of soluble elements can distort results.

Bedrocks / riverine particles transitions:

SL sample results are relatively homogeneous and elements/ Al_2O_3 are the same order as bedrock samples. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ values vary between 2.48 and 2.78; $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ values vary between 1 and 1.33; and loss on ignition/ Al_2O_3 values vary between 1.08 and 1.39. Mechanical weathering has also no effect on the marls composition, which are exported by rivers without qualitative change.

Chapitre IV : Comportement de la MOF face aux altérations supergènes

P1 profile	SiO2 AR	TiO2 AR	Fe2O3 AR	MnO AR	MgO AR	CaO AR	Na2O AR	K2O AR	P2O5 AR	loss on ignition AR
P1 0	2.816	0.047	0.319	0.004	0.085	0.871	0.039	0.173	0.012	1.054
P1 5	2.845	0.048	0.383	0.004	0.086	0.856	0.041	0.179	0.018	1.031
P1 10	2.828	0.047	0.353	0.004	0.086	0.884	0.040	0.176	0.012	1.046
P1 15	2.981	0.050	0.341	0.004	0.087	0.869	0.042	0.176	0.012	1.081
P1 20	2.862	0.048	0.346	0.003	0.083	0.826	0.040	0.173	0.011	0.977
P1 25	2.845	0.047	0.385	0.004	0.086	0.873	0.041	0.177	0.015	0.975
P1 30	2.818	0.046	0.365	0.004	0.086	0.893	0.041	0.173	0.011	0.998
P1 35	2.850	0.047	0.396	0.005	0.093	1.163	0.042	0.174	0.011	1.253
P1 40	2.720	0.045	0.365	0.005	0.088	1.120	0.041	0.169	0.012	1.194
P1 45	2.673	0.044	0.337	0.005	0.085	0.989	0.039	0.164	0.010	1.119
P1 50	2.706	0.044	0.427	0.005	0.087	1.020	0.040	0.164	0.011	1.127
P1 55	2.755	0.045	0.409	0.006	0.094	1.249	0.042	0.163	0.012	1.320
P1 60	2.705	0.045	0.360	0.005	0.088	1.124	0.041	0.165	0.013	1.218
P1 65	2.889	0.047	0.333	0.007	0.094	1.517	0.043	0.167	0.016	1.542
P1 70	2.907	0.045	0.408	0.007	0.102	1.645	0.045	0.160	0.017	1.680
P1A profile	SiO2 AR	TiO2 AR	Fe2O3 AR	MnO AR	MgO AR	CaO AR	Na2O AR	K2O AR	P2O5 AR	loss on ignition AR
P1A 0	2.761	0.048	0.313	0.003	0.083	0.739	0.026	0.147	0.004	0.929
P1A 10	2.652	0.045	0.337	0.004	0.083	0.774	0.025	0.150	0.003	0.956
P1A 20	2.624	0.044	0.334	0.004	0.082	0.780	0.026	0.149	0.002	0.952
P1A 25	2.662	0.046	0.322	0.003	0.080	0.728	0.025	0.150	0.001	0.925
P1A 30	2.651	0.046	0.313	0.004	0.082	0.777	0.025	0.148	0.000	0.984
P1A 35	2.624	0.045	0.313	0.004	0.081	0.794	0.026	0.148	0.000	0.955
P1A 40	2.645	0.045	0.333	0.004	0.084	0.911	0.026	0.154	0.001	1.136
P1A 45	2.697	0.045	0.377	0.005	0.088	1.127	0.027	0.151	0.002	1.274
P1A 50	2.782	0.044	0.411	0.007	0.100	1.443	0.029	0.152	0.002	1.520
P1A 55	2.804	0.045	0.403	0.007	0.103	1.633	0.028	0.150	0.001	1.700
P1A 60	2.821	0.045	0.407	0.007	0.099	1.544	0.030	0.153	0.006	1.623
P1A 65	2.659	0.045	0.320	0.003	0.084	0.831	0.027	0.155	0.003	0.961
P1A 70	2.731	0.045	0.288	0.003	0.086	0.812	0.027	0.155	0.010	0.999
P2 profile	SiO2 AR	TiO2 AR	Fe2O3 AR	MnO AR	MgO AR	CaO AR	Na2O AR	K2O AR	P2O5 AR	loss on ignition AR
A layer	2.602	0.043	0.341	0.004	0.076	0.672	0.029	0.159	0.010	1.197
P2 PL 20	2.572	0.042	0.328	0.003	0.079	0.741	0.028	0.155	0.008	1.045
P2 PL 25	2.614	0.042	0.303	0.003	0.078	0.695	0.030	0.158	0.005	0.998
P2 PL 30	2.624	0.043	0.311	0.003	0.090	0.642	0.030	0.157	.	0.956
P2 PL 35	2.623	0.042	0.325	0.003	0.077	0.766	0.031	0.160	.	1.026
P2 PL 40	2.865	0.044	0.397	0.006	0.098	1.183	0.036	0.160	.	1.361
P2 PL 45	2.805	0.045	0.321	0.004	0.090	1.028	0.036	0.163	.	1.278
P2 PL 50	2.683	0.043	0.312	0.003	0.077	0.839	0.032	0.167	.	1.093
P2 PL 55	2.736	0.043	0.331	0.005	0.078	1.087	0.032	0.165	0.007	1.245
P2 PL 60	2.696	0.043	0.318	0.005	0.076	0.830	0.033	0.166	0.020	1.049
P2 PL 65	2.714	0.043	0.341	0.004	0.088	0.841	0.033	0.166	.	1.094
P2 PL 70	2.693	0.044	0.311	0.004	0.088	0.797	0.033	0.169	.	1.019
P2 PL 75	2.706	0.044	0.288	0.003	0.090	0.743	0.035	0.170	.	0.996
P2 PL 80	2.632	0.044	0.306	0.003	0.091	0.708	0.033	0.170	.	0.995
P2 PL 85	2.629	0.044	0.318	0.004	0.093	0.765	0.033	0.166	.	1.019
P2 PL 90	2.645	0.044	0.275	0.005	0.075	1.429	0.033	0.159	.	1.489
P2 PL 95	2.873	0.048	0.320	0.003	0.072	0.859	0.034	0.171	0.010	0.934
P2 PL 100	2.992	0.050	0.302	0.004	0.086	1.115	0.038	0.174	.	1.134
P2 PL 110	2.866	0.050	0.324	0.003	0.075	0.719	0.035	0.170	0.011	0.861
P2 PL 115	2.746	0.047	0.299	0.002	0.075	0.761	0.034	0.163	0.008	0.873
P2 PL 120	2.697	0.047	0.325	0.002	0.085	0.595	0.034	0.173	.	0.773
P2 PL 125	2.761	0.048	0.327	0.004	0.088	0.900	0.036	0.170	.	1.044
P2 PL 135	2.923	0.049	0.345	0.004	0.094	1.221	0.060	0.185	.	1.335
P2 TF 20	2.847	0.047	0.363	0.003	0.070	0.863	0.031	0.169	0.008	1.147
P2 TF 25	2.872	0.047	0.346	0.003	0.071	0.833	0.031	0.167	0.004	1.088
P2 TF 30	2.776	0.045	0.388	0.004	0.070	0.852	0.029	0.158	0.003	1.095
P2 TF 35	2.778	0.045	0.343	0.004	0.072	0.811	0.030	0.161	0.004	1.093
P2 TF 40	2.911	0.046	0.417	0.004	0.076	1.121	0.030	0.155	0.007	1.258
P2 TF 45	2.986	0.046	0.413	0.005	0.081	1.283	0.032	0.158	0.011	1.541
P2 TF 50	3.079	0.047	0.412	0.005	0.079	1.339	0.033	0.159	0.005	1.539
P2 TF 55	3.010	0.047	0.395	0.005	0.077	1.144	0.032	0.161	0.005	1.341
P2 TF 60	3.072	0.047	0.408	0.005	0.077	1.166	0.032	0.160	0.004	1.349
P2 TF 65	2.958	0.045	0.320	0.005	0.080	1.070	0.029	0.156	0.002	1.363
P2 IF 70	3.023	0.046	0.411	0.006	0.077	1.126	0.032	0.167	0.006	1.354
P2 TF 75	2.786	0.044	0.399	0.005	0.081	0.939	0.030	0.159	0.005	1.179
P2 TF 80	2.727	0.046	0.382	0.004	0.080	0.947	0.029	0.153	0.003	1.252
P2 TF 85	2.905	0.047	0.350	0.004	0.076	0.951	0.032	0.156	0.004	1.135
P2 TF 90	2.921	0.049	0.321	0.004	0.078	0.845	0.033	0.158	0.004	1.081
P2 TF 95	2.909	0.049	0.341	0.005	0.079	0.899	0.032	0.159	0.004	1.104
P2 TF 100	2.959	0.050	0.367	0.005	0.078	0.946	0.033	0.159	0.002	1.173
P2 TF 110	2.977	0.048	0.415	0.007	0.080	0.900	0.031	0.161	0.001	1.152
P2 TF 115	2.852	0.049	0.346	0.008	0.079	0.760	0.031	0.159	0.001	1.007
P2 TF 120	2.845	0.049	0.354	0.006	0.080	0.718	0.032	0.164	0.004	0.937
P2 TF 125	2.858	0.047	0.394	0.005	0.084	0.994	0.031	0.160	0.001	1.182
P2 TF 135	2.856	0.047	0.384	0.004	0.084	1.135	0.034	0.160	0.005	1.313
P3 profil	SiO2 AR	TiO2 AR	Fe2O3 AR	MnO AR	MgO AR	CaO AR	Na2O AR	K2O AR	P2O5 AR	loss on ignition AR
P3 6	2.757	0.046	0.382	0.016	0.081	1.406	0.028	0.167	.	<=0,1
P3 12	2.697	0.046	0.401	0.017	0.071	1.049	0.030	0.162	0.018	0.269
P3 18	2.737	0.046	0.394	0.016	0.081	1.052	0.027	0.162	0.007	0.110
P3 24	2.700	0.046	0.398	0.016	0.081	1.278	0.029	0.163	0.008	0.110
P3 30	2.685	0.045	0.378	0.015	0.083	1.322	0.029	0.167	0.008	0.110
P3 36	2.695	0.046	0.374	0.015	0.085	1.421	0.029	0.170	0.008	0.110
P3 42	2.673	0.045	0.378	0.014	0.086	1.513	0.030	0.171	0.008	0.100
P3 48	2.648	0.045	0.378	0.019	0.085	1.562	0.030	0.165	0.008	0.110
P3 54	2.645	0.046	0.368	0.016	0.086	1.621	0.031	0.167	0.008	0.100
P3 60	2.624	0.045	0.391	0.013	0.070	1.694	0.030	0.163	0.016	1.617
riverine particles	SiO2 AR	TiO2 AR	Fe2O3 AR	MnO AR	MgO AR	CaO AR	Na2O AR	K2O AR	P2O5 AR	loss on ignition AR
"Le Laval" SL July 2006	2.480	0.045	0.325	0.006	0.109	0.995	0.029	0.165	0.008	1.081
"Le Laval" SL early August 2006	2.531	0.046	0.335	0.006	0.111	1.063	0.032	0.170	0.008	1.232
"Le Laval" SL late August 2006	2.626	0.047	0.358	0.006	0.120	1.101	0.033	0.165	0.009	1.206
"Le Laval" SL September 2006	2.599	0.048	0.346	0.006	0.117	1.021	0.031	0.166	0.008	1.139
"Le Laval" SL December 2006	2.764	0.048	0.394	0.007	0.125	1.233	0.034	0.164	0.008	1.277
"Le Laval" SL June 2007	2.775	0.049	0.401	0.007	0.115	1.115	0.034	0.163	0.007	1.171
"Le Laval" SL November 2006	2.782	0.048	0.394	0.007	0.141	1.330	0.037	0.162	0.008	1.391
"Le Laval" January 2008	2.735	0.048	0.376	0.007	0.122	1.108	0.033	0.161	0.008	1.238

Table IV-3: Samples mineral contents normalised against Al₂O₃ contents (noted AR).

5 – 4 – Fate of fossil organic Matter in pools transitions

As for ICP analysis, quantitative palynofacies results are standardized to Al_2O_3 contents.

Bedrocks / weathering profiles transition

Bedrock-weathering profile transfer along P1 and P2 PL profiles (figure IV-13a,b) has no incidence on the FOM content. $\text{FOM}/\text{Al}_2\text{O}_3$ values vary between 0.28 and 0.38 in P1 profile and between 0.27 and 0.59 in P2 PL profile. We either do not observe particular behaviour of the diverse observed FOM particles. Inversely, we observe a significant pyrite/ Al_2O_3 decrease along these two profiles illustrated by values dropping from 0.017 to 0.003 in P1 profile and from 0.016 to 0.001 in P2 PL profile. Altered P1A (figure 13a) profile present different results. Indeed FOM globally resist, but all observed particles do not present the same trends during P1 / P1A transition. $\text{FOM}/\text{Al}_2\text{O}_3$ values (after level correction) are close to those measured in P1 profile and average 0.31. $\text{OLC}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (average 0.015 in P1 profile and 0.016 in P1A) and $\text{RAOM}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (average 0.010 in the two profiles) are not affected too. Inversely, $\text{GDgr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ values are affected and lose around 20 % between P1 and P1A while pyrite/ Al_2O_3 loose 83 %.

Weathering profiles / soils transition

In the P2 A soil layers, we showed that organic matter is a mixing of FOM and ROM (principally GA) (figure IV-13b). The transfer between weathering profiles and soils, marked by biological activity, is accompanied by a decrease in FOM concentration, illustrated by a $\text{FOM}/\text{Al}_2\text{O}_3$ value dropping to 0.022 (average 0.038 in PL samples). We do not observe real FOM evolution all along P3 profile (figure IV-13c). Indeed, OLC, RAOM and $\text{GDgr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ values remains relatively constant from the bottom to the top of the profile (respectively around 0.011, 0.006 and 0.008). Conversely, we observe a quick ROM disappearing with depth ($\text{ROM}/\text{Al}_2\text{O}_3$ falls from 0.161 to 0.004).

Weathering profiles / TF transition

P2 TF samples organic matter is composed with FOM and ROM (mainly GA and GLC) (figure IV-13b). ROM occurrence quickly falls towards the depth, associated with a strong TOC and HI fall and T_{max} increase. FOM appears more resistant, and shows, from 40

cm depth to the bottom of the profile, a concentration close to the one calculated in PL samples (FOM /Al₂O₃ average 0.039 in PL samples and 0.042 in TF samples). OLC particles are slightly more concentrated in TF samples (OLC/Al₂O₃ averages 0.018 in PL samples and 0.022 in TF samples), as well as RAOM particles (RAOM/Al₂O₃ averages 0.013 in PL samples and 0.014 in TF samples). GDgr particles are slightly less concentrated (GDgr/Al₂O₃ average 0.008 in PL samples and 0.007 in TF samples). This shows that chemical weathering little affects FOM and particularly GDgr particles. The first 20 cm (from 20 to 40 cm) differ, because TF samples FOM concentration appears close to those measured in horizons A. FOM loose between PL and TF samples averages 28 % (FOM /Al₂O₃ averages 0.032 in PL samples and 0.023 in TF samples). But such loose varies according to the nature of the observed particles. Indeed, OLC particles relatively resist to weathering because decrease averages 13 % (OLC/Al₂O₃ averages 0.013 in PL samples and 0.012 in TF samples), instead MOAR and GDgr particles, respectively characterized by losses averaging 39 and 43 %, appear weaker (MOAR/Al₂O₃ average 0.012 in PL samples and 0.008 in TF samples and GDgr/Al₂O₃ averages 0.006 in PL samples and 0.004 in TF samples). Note that pyrite disappears in TF samples.

Bedrocks / riverine particles transition:

Obtained results indicate that bedrock to riverine particles transfer (figure IV 13d) has no significant quantitative and qualitative impacts on liberated FOM. No mineralization of the marls organic content occurs during regressive erosion. One can notes that pyrite is found in all riverine particles samples.

All these results permit to discuss around two points:

Firstly, it appears that FOM alteration depends on the kind of weathering, but also on the kind of particles. Mechanical weathering has no impact on marls organic contents. Chemical weathering (bedrocks / weathering profiles transition) seems to have no effect on the OLC and RAOM particles whereas it affects GDgr particles (20 %). At weathering profile / soils and PL / TF transitions, bacterial activity affects FOM, but OLC better resist whereas RAOM and GDgr losses average 40 %. Such results are in agreement with previous studies; indeed Petch *et al* (2000) showed a FOM partial mineralization along weathering profiles, whereas Copard *et al* (2005), using Rock-Eval signal deconvolution, showed that weathering process do not affect all FOM compounds in the same way. Conversely, in all studied

profiles, pyrite appears very sensitive to (bio)chemical weathering and its occurrence drop quickly (figure IV-14) and loose up to 90 %.

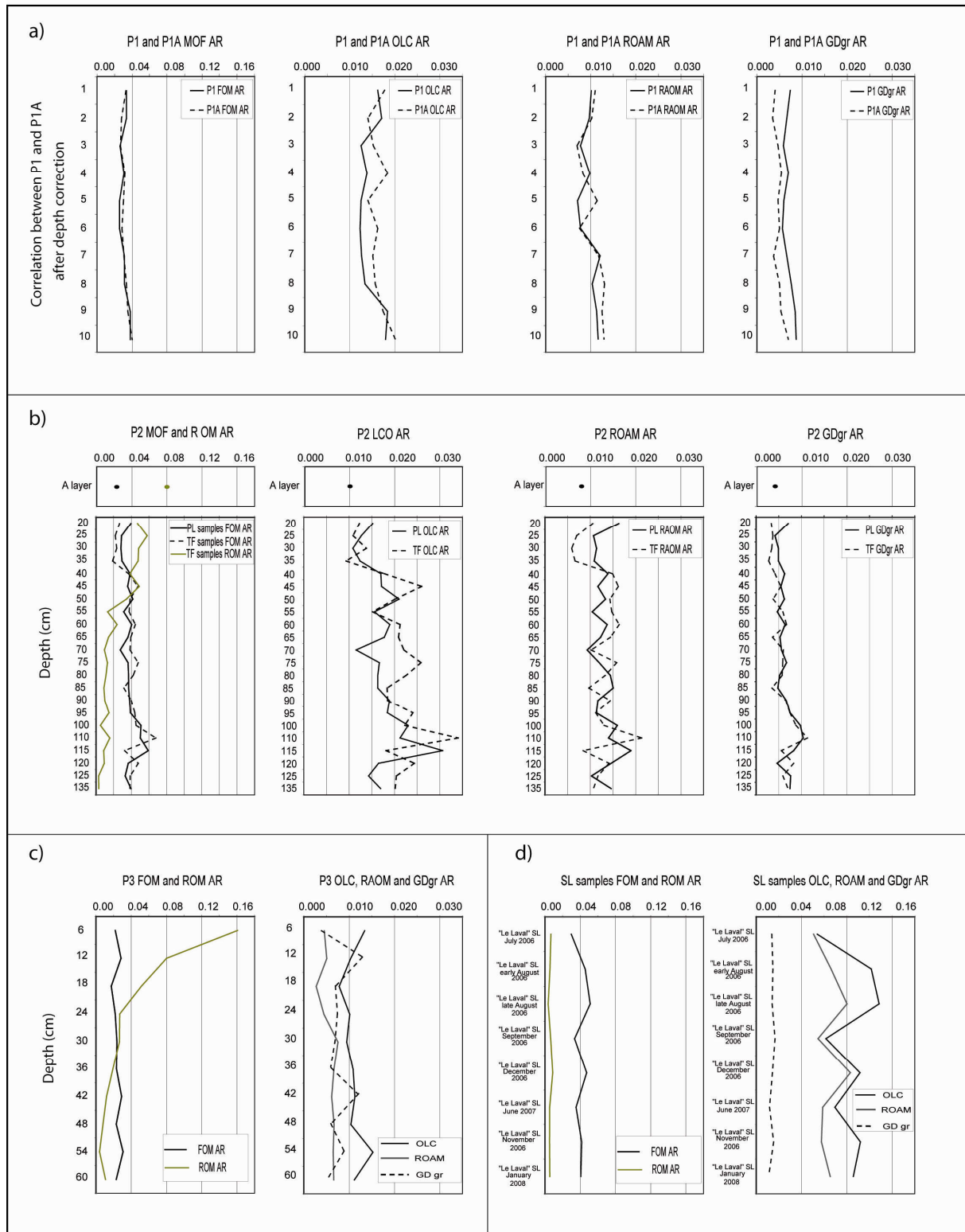


Figure IV-13: Quantitative palynofacies results normalised against Al_2O_3 contents (noted AR) along profiles P1 and P1A (a), P2 (b) and P3 (C). FOM is the sum of OLC, ROAM and GD particles, ROM is the sum of LC, AG, CGAOM and figurate elements.

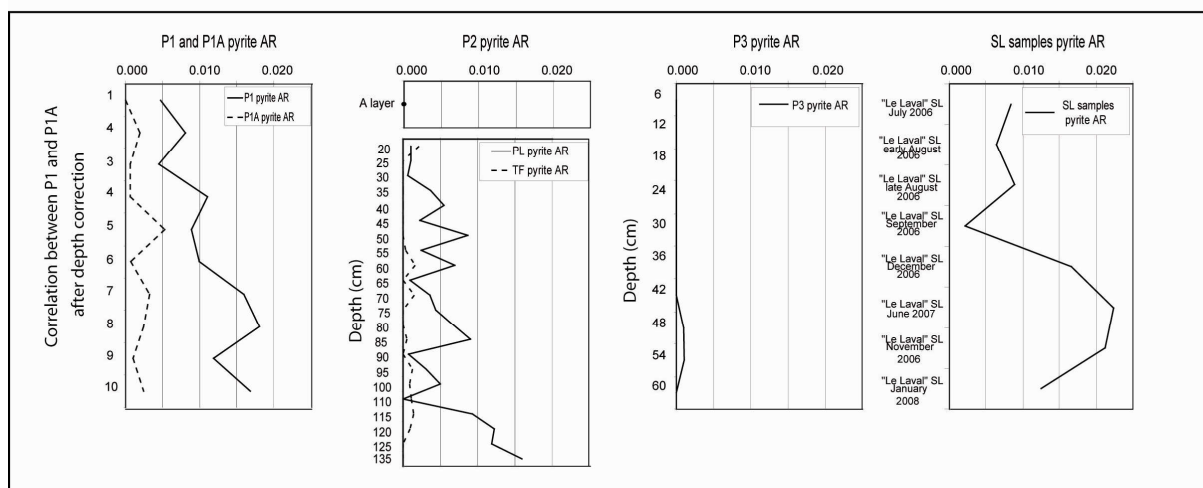


Figure IV-14: Pyrite concentrations normalised against Al_2O_3 contents (noted AR) along studied profiles

Secondly, FOM fossil can no longer be simply considered as a source of carbon to the atmosphere. Its contribution has to be definitively taken into account in organic stocks and fluxes estimates at local and global scales. Obtained results pointed out the fact that FOM and pyrite are found at the watershed outlet without qualitative or quantitative change. The comparison of P1 and P1A profiles datas shows that 6 months exposition to surface conditions are insufficient to significantly alter FOM. Considering that the time transport of fluvial particles between Laval watershed and Rhône delta does not exceed five days, results suggests that FOM could significantly contribute to Rhône organic content. Such hypothesis is confirmed by the following points. We find same FOM particles in the downstream rivers loads (Bouinenc and Bléone BL samples). The Rhône's SL sampled into the river estuary contains significant FOM particles. In detail, it is difficult to assign a simple fossil origin to Co-OLC particles, which may be modern combustions residues, but certified FOM, such as OLC, RAOM, OAOM and GDgr, can reach 25 % of observed particles.

Conclusion

Quantitative palynofacies is a new and accurate method that allows to discriminate and to quantify each kind of organic particles in soils, bedrocks and along weathering profiles. It allows to discriminate ROM from FOM particles, and to follow FOM during and after its releasing after bedrock weathering. Obtained results highlight FOM contribution that can be founded in all studied samples. They also indicate that FOM is very resistant to weathering process: observed losses do not exceed 30 %. In detail, we show that such loss varies according to weathering processes and observed particles natures. Indeed, mechanical weathering has no qualitative and quantitative impact on released FOM, that directly feeds riverine particles. Chemical weathering does not affect OLC and RAOM particles while GDgr particles lose up to 20 % of their mass. Biochemical weathering has a maximum impact on FOM which losses 30 %. However, OLC particles only loose 8 %, while RAOM and GDgr particles losses reaches 40 %. At a local scale, the solid materials load exported from Laval watershed has been estimated at more than 170 t / ha / yr (Mathys 2006). Considering our results, that means that 0.85 t / ha / yr of FOM are exported directly, ripped from rock and alterites to river. Such geologic formations would be then a major source of the Rhône river organic load.

Acknowledgements

This work is a contribution of the GIS 'Bassins de Draix, étude de l'érosion en montagne' driven by the Cemagref and was financially supported by the CNRS programme INSU PNSE-ACI : Influence de l'érosion sur les flux de matière organique fossile dans les géosystèmes continentaux actuels (sols, cours d'eau) : bassins expérimentaux de Draix, Alpes de Haute Provence, France. The authors warmly thank Marielle Hatton, Rachel Boscardin for their assistances.

References

- Adams, J., Faure, H., 1996. Changes in moisture balance between glacial and interglacial conditions/ influence on carbon cycle processes, in: Brandson, J., Brown, AG., Gregory, KJ. (Eds), *Global Continental Change: The Context of Paleohydrology*. Geological Society of London, Special Publication 115, 27-42.
- Aitkenhead, JA., McDowell, WH., 2000. Soil C:N ratio as a predictor of annual riverine DOC fluxes at local and global scales. *Global Biogeochemical Cycles* 14, 127-138.
- Amiotte-Suchet, P., 1995. Cycle du carbone, érosion chimique des continents et transferts vers les océans. *Mémoire des Sciences Géologiques* 97. University of Strasbourg.
- Amiotte-Suchet, P., Probst, J.L., Ludwig, W., 2003. Worldwide distribution of continental rock lithology: implications for the atmospheric/soil CO₂ uptake by continental weathering and alkalinity rivers transport to the oceans. *Global Biogeochemical Cycles* 17(2): 1038.
- Balesdent, J., 1996. The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. *European Journal of Soil Science* 47, 485-493.
- Batjes, NH., 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47, 141-163.
- Battarbee, R.W., Kneen, M.J., 1982. The use of electronically counted microspheres in absolute diatom analysis. *Limnol. Oceanogr.* 27(1), 184-188.
- Behar, F., Beaumont, V., Pentead, H.L. De B., 2001, Rock-Eval 6 Technology: Performances and Developments. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* 56(2), 111-134.
- Berner, RA., Lasaga, AC., Garrels, RM., 1983. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effects on atmospheric carbon dioxide over the past 100 millions years. *American Journal of Science* 283, 641-683.
- Berner, RA., 1989. Biogeochemical cycles of carbon and sulphur and their effect on atmospheric oxygen over Phanerozoic time. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol* 75: 97-122.
- Berner, R.A., 1992. Comments on the role of marine of marine sediment burial as a repository for anthropogenic CO₂. *Global Biogeochemical Cycles*, 6(1), 1-2.
- Blair, N.E., Leithold, E.L., Ford, S.T., Peeler, K.A., Holmes, J.C., Perkey, D.W., 2003. The persistence of memory: The fate of ancient sedimentary organic carbon in a modern sedimentary system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(1), pp. 63-73.
- Blair, N.E., Leithold, R.L., Aller, R.C., 2004. From bedrock to burial: the evolution of particulate organic carbon across coupled watershed-continental margin systems. *Marine Chemistry*, 92, 141-156.
- Carter, MR., Angers, DA., Gregorich, EG., Bolinder, MA., 1997. Organic carbon storage and nitrogen stocks and storage profiles in cool, humid soils of eastern Canada. *Canadian Journal of Soils Science* 77(2), 205-210.
- Copard, Y., Di-Giovanni, C., Martaud, T., Albéric, P., Olivier, J.E., 2006. Using Rock-Eval 6 pyrolysis for tracking fossil organic carbon in modern environments: implications for the roles of erosion and weathering. *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 135-153.
- Copard, Y., Amiotte-Suchet, P. Di-Giovanni, C., 2007. Storage and release of fossil organic carbon related to weathering of sedimentary rocks. *Earth and Planetary Science Letters* 258, 345-357.
- Combaz, A., 1964. Les palynofaciès. *Revue de Micropaléontologie* 7, 205-218.
- Combaz, A., Bellet, J., Poulain, C.I., Tissot, C., 1974. L'étude microscopique de la matière organique des sédiments quaternaires de mer de Norvège. *Géochimie organique des sédiments marins profonds, mer de Norvège*, Eds CNRS.
- Comont, L., Laggoun-Defarge, F., Disnar, J.R., 2006. Evolution of organic matter indicators in response to major environmental changes: The case of a formerly cut-over peat bog (Le Russey, Jura Mountains, France). *Organic Geochemistry* 38(12), 1736-1751.
- Degens, E.T., Kempe, S., Richey, J.E., 1991, Biogeochemistry of major world rivers, in *Biogeochemistry of major world rivers* Degen, ET., Kempe, S., Richey, JE. (Eds), *SCOPE* 42, pp 323-344.

- Dickens, A.F., Gélinas, Y., Hedges, J.I., 2004a. Physical separation of combustion and rock sources of graphitic black carbon in sediments. *Marine Chemistry*, 92(1-4), 215-223.
- Dickens, A.F., Gélinas, Y., Hedges, J.I., 2004b. Reburial of fossil organic carbon in marine sediments. *Nature* 427, 336-339.
- Di-Giovanni, C., Disnar, J.R., Bichet, V., Campy, M., 1998a. Sur la présence de matière organique méso-cénozoïque dans les humus actuels (bassin de Chaillexon, Doubs, France). *C.R.Acad. Sciences Paris*, 326, 553-559.
- Di-Giovanni, C., Disnar, J.R., Campy, M., Macaire, J.J., 1999a. Variability of the ancient organic supply in modern humus. *Analusis* 27(5), 398-402.
- Di-Giovanni, C., Disnar, J.R., Turpin, S., Bréheret, J.G., 1999b. Estimation de la contribution des matières organiques remaniées au stock organique des sols et sédiments lacustres (bassin des Peyssiers, hautes Alpes, France). *Bulletin de la Société Géologique de France* 170, 121-129.
- Di-Giovanni, C., Disnar, J.R., Bakyono, J.P., Keravis, D., Millet, F., Olivier, J.E., 2000. Application de l'étude de la matière organique à l'analyse de l'érosion : exemple du bassin versant du Moulin, dans les terres Noires des Alpes de Haute Provence, France. *C.R. Acad. Sciences Paris*, 331, 7-14.
- Di-Giovanni, C., Disnar, J.R., Macaire, J.J., 2002. Estimation of the annual yield of organic carbon released from carbonates and shales by chemical weathering. *Global and Planetary Change* 32, 327-343.
- Disnar, J.R., Guillet, B., Keravis, D., Di-Giovanni, C., Sebag, D., 2003. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: scope and limitations. *Organic geochemistry* 34, 327-343.
- Eglinton, T.I., Benitez-Nelson, B.C., Pearson, A., McNichol, A.P., Bauer J.E., Druffel, E.R.M., 1997. Variability in Radiocarbon Ages of Individual Organic Compounds from Marine Sediments. *Science* 277, (796).
- Espitalié, J., Deroo, G., Marquis, F., 1985. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* 40(5), 563-579.
- Eswaran, H., Van Den Berg, E., Reich, P., 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal* 57, 192-194.
- Holland, H.D., 1978. *The Chemistry of Atmosphere and Oceans*. Wiley Interscience Publishers.
- Houghton, R.A., 1998. Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance. *Global Biogeochemical Cycles* 12(1), 25-34.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Salomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, L., Averyt, K., Tignor, M., Leroy-Miller, H., Zhenlin C., (Eds). Cambridge University Press.
- Lafargue, E., Marquis, F., Pilot, D., 1998. Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production and soil contamination studies. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* 53(4), 421-437.
- Leithold, R.L. et Blair, N.E., 2001. Watershed control on the carbon loading of marine sedimentary particles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65 (14), 2231-2240.
- Lichtfouse, E., Bardoux, G., Mariotti, A., Balesdent, J., Ballentine, D.C., Mack, S.A., 1997a. Molecular ¹³C and ¹⁴C evidence for the allocthonous and ancient origin of C₁₆-C₁₈ n-alkanes in modern soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 1891-1898.
- Lichtfouse, E., Budzinski, E., Garrigues, P., Eglinton, T.I., 1997b. Ancient polycyclic aromatic hydrocarbons in modern soils: ¹³C, ¹⁴C and biomarkers evidence. *Org. Geochem.* 26, 353-359.
- Ludwig, W., Probst, J.L., Kempe, S., 1996. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles* 10(1), 23-41.
- Kao, S.J., Liu, K.K., 1996. Particulate organic carbon export from a subtropical mountainous river (Lanyang Hsi), in Taiwan. *Limnol. Oceanogr.* 41, 1749-1757.
- Mathys, N., 2006. Analyse et modélisation à différentes échelles des mécanismes d'érosion et de transport de matériaux solides. Cas des petits bassins versants de montagne sur marnes (Draix, Alpes de Haute Provence). Doctoral thesis. Polytecnic'national institut of Grenoble.

- Masiello, C.A. et Druffel, E.R.M, 2001. Carbon Isotope Geochemistry of the Santa Clara River. *Global Biogeochemical Cycles* 15(2), 407-416.
- Petsch, ST., Berner, RA., Eglinton, TI., 2000. A field study of the chemical weathering of ancient sedimentary organic matter. *Organic Geochemistry* 31, 475-487.
- Probst, JL., 1992. Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale, Mécanismes, bilan global actuel et fluctuation au cours des 500 derniers millions d'années. Mémoire des Sciences Géologiques 94. University of Strasbourg.
- Raymond, P.A., Bauer, J.E., 2001, Riverine export of aged terrestrial organic matter to the North Atlantic Ocean. *Nature* 409, 497-500.
- Raymond, P.A., Bauer, J.E., 2004. Controls on the variability of organic matter and dissolved inorganic carbon ages in northeast US rivers. *Marine Chemistry*, 92, (1-4), 353-366.
- Tyson, R.V., 1995. Sedimentary organic matter: organic facies and palynofacies. Chapman et Hall, London.
- Rotaru, M., Gaillardet, J., Steinberg, M., Trichet, J., 2006. Les climats passés de la terre. Eds Vuibert, Paris.
- Sebag, D., Di Giovanni, C., Ogier, S., Mesnage, V., Laggoun-Défarge F., Durand, A., 2005. Inventory of sedimentary organic matter in modern wetland (Marais Vernier, Normandy, France) as source-indicative tools to study Holocene alluvial deposits (Lower Seine Valley, France). *International Journal of Coal Geology* 67, 1-16.
- Sebag, D., Copard, Y., Di-Giovanni, C., Durand, A., Laignel, B., Ogier, S., Lallier-Verges, E., 2006. Palynofacies as useful tool to study origins and transfers of particulate organic matter in recent terrestrial environments: Synopsis and prospect. *Earth-Science Reviews* 79, 241-259.
- Stallard, R.F., 1998. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(2) 231-257.
- Vernal, A., Larouche, A., Richard, J.H., 1987. Evaluation of palynomorph concentrations: do the aliquot and the marker-grain methods yield comparable results? *Pollen and Spores*, XXIX (2-3), 291-304.
- Wakeham, S.G., Forrest, J., Masiello, C., Gaelinas, Y., Alexander, C., Leavitt, P., 2004. Hydrocarbons in Lake Washington Sediments. A 25-Year Retrospective in an Urban Lake. *Environ. Sci. Technol.* 38, 431-439.

A- 3) Résultats : bassin versant du Brusquet

A-3-1) Résultats de l'analyse ICP normés aux % Al_2O_3

A l'instar de la MO, une altération différentielle des éléments minéraux peut fausser l'interprétation des données obtenues par analyse ICP. Les résultats présentés (notés PNA) seront donc, tout comme pour la MO, normés à l' Al_2O_3 .

A-3-1-1) Profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat

Ces profils sont situés sur roche toarcienne et sous couvert forestier. Le positionnement des échantillons est rappelé en figure IV-15. Nous avons observé, dans le chapitre précédent, un changement brusque de lithologie au sein du profil 06-BRU S1, entre 40 et 45 cm de profondeur (cf. § III-D-2-1).

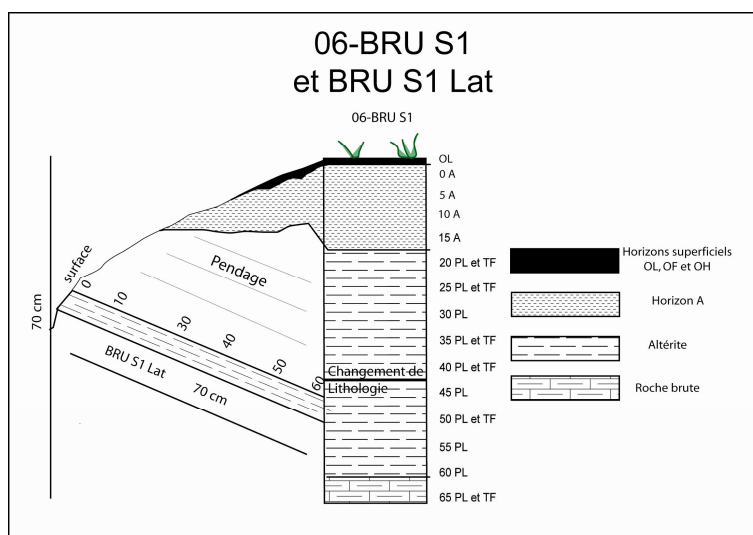


Figure IV-15 : Rappel de la position des échantillons des profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat.

Les PNA mesurés sont présentés dans le tableau IV-4.

- **06-BRU S1, échantillons A** : Les PNA moyens sont : 3,47 pour SiO_2 , 1,43 pour CaO , et 0,34 pour Fe_2O_3 . Celui de la perte au feu augmente vers la surface, de 1,24 à 1,76.

- **06-BRU S1, échantillons PL** : Ces échantillons se distinguent en deux ensembles. De 20 à 45 cm, les PNA moyens sont très proches de ceux mesurés dans les échantillons A. Ils

oscillent autour de 3,55 pour SiO_2 , 1,37 pour CaO , et 0,34 pour Fe_2O_3 . Les PNA de la perte au feu sont par contre plus variables et évoluent entre 1,20 et 1,92.

Les échantillons plus profonds se distinguent par des PNA de CaO , de perte au feu et de Fe_2O_3 plus faibles (respectivement 0,93, 1,10 et 0,29).

- **06-BRU S1, échantillons TF** : Les PNA moyens sont de 3,32 pour SiO_2 , 0,99 pour CaO , 1,17 pour la perte au feu et 0,30 pour Fe_2O_3 .

- **BRU S1 Lat** : Les PNA moyens sont de 3,37 pour SiO_2 , 1,12 pour CaO , 1,18 pour la perte au feu et 0,29 pour Fe_2O_3 . Seuls les PNA du CaO présentent une tendance nette, marquée par une chute, de la base au sommet du profil (de 1,26 à 1,03).

Echantillons	SiO2 PNA	TiO2 PNA	Al2O3 PNA	Fe2O3 PNA	MnO PNA	MgO PNA	CaO PNA	Na2O PNA	K2O PNA	P2O5 PNA	Perte au feu PNA
06 BRU S1 A 0 cm	3.49	0.05	1.00	0.34	0.01	0.11	1.48	0.03	0.15	0.01	1.76
06 BRU S1 A 5 cm	3.50	0.05	1.00	0.35	0.01	0.11	1.44	0.03	0.16	0.01	1.68
06 BRU S1 A 10 cm	3.46	0.05	1.00	0.35	0.01	0.11	1.58	0.03	0.16	0.01	1.68
06 BRU S1 A 15 cm	3.44	0.05	1.00	0.34	0.00	0.10	1.21	0.03	0.15	0.01	1.24
06 BRU S1 PL 20 cm	3.43	0.05	1.00	0.33	0.00	0.10	1.06	0.03	0.15	0.01	1.20
06 BRU S1 PL 25 cm	3.41	0.05	1.00	0.32	0.00	0.10	1.17	0.03	0.16	0.01	1.26
06 BRU S1 PL 30 cm	3.58	0.05	1.00	0.33	0.00	0.11	1.49	0.03	0.15	0.01	1.53
06 BRU S1 PL 35 cm	3.70	0.05	1.00	0.39	0.01	0.11	1.95	0.03	0.15	0.01	1.92
06 BRU S1 PL 40 cm	3.62	0.05	1.00	0.35	0.00	0.11	1.19	0.04	0.15	0.01	1.29
06 BRU S1 PL 45 cm	3.52	0.05	1.00	0.30	0.00	0.13	0.85	0.03	0.15	0.01	1.05
06 BRU S1 PL 50 cm	3.53	0.05	1.00	0.28	0.00	0.13	0.84	0.03	0.15	0.01	1.02
06 BRU S1 PL 55 cm	3.43	0.05	1.00	0.28	0.00	0.14	0.87	0.03	0.15	0.01	1.04
06 BRU S1 PL 60 cm	3.44	0.05	1.00	0.31	0.00	0.14	1.00	0.03	0.15	0.01	1.14
06 BRU S1 PL 65 cm	3.38	0.05	1.00	0.28	0.00	0.13	1.09	0.03	0.15	0.01	1.24
Echantillons	SiO2 PNA	TiO2 PNA	Al2O3 PNA	Fe2O3 PNA	MnO PNA	MgO PNA	CaO PNA	Na2O PNA	K2O PNA	P2O5 PNA	Perte au feu PNA
06 BRU S1 TF 20 cm	3.42	0.05	1.00	0.28	0.00	0.11	1.01	0.03	0.15	0.01	1.17
06 BRU S1 TF 25 cm	3.33	0.05	1.00	0.27	0.00	0.10	0.97	0.03	0.15	0.01	1.17
06 BRU S1 TF 35 cm	3.34	0.05	1.00	0.28	0.00	0.11	1.03	0.03	0.15	0.01	1.21
06 BRU S1 TF 40 cm	3.28	0.05	1.00	0.30	0.00	0.10	0.91	0.03	0.14	0.01	1.12
06 BRU S1 TF 50 cm	3.32	0.05	1.00	0.34	0.00	0.13	0.87	0.03	0.15	0.01	1.04
06 BRU S1 TF 65 cm	3.24	0.05	1.00	0.30	0.00	0.12	1.12	0.03	0.15	0.01	1.32
Echantillons	SiO2 PNA	TiO2 PNA	Al2O3 PNA	Fe2O3 PNA	MnO PNA	MgO PNA	CaO PNA	Na2O PNA	K2O PNA	P2O5 PNA	Perte au feu PNA
BRU S1 Lat surface	3.32	0.05	1.00	0.27	0.00	0.12	1.03	0.04	0.16	0.01	1.18
BRU S1 Lat	3.35	0.05	1.00	0.27	0.00	0.14	1.07	0.03	0.14	0.01	1.17
BRU S1 Lat	3.38	0.05	1.00	0.31	0.00	0.15	1.13	0.03	0.14	0.01	1.24
BRU S1 Lat	3.42	0.05	1.00	0.29	0.00	0.12	1.10	0.04	0.14	0.01	1.19
BRU S1 Lat	3.38	0.05	1.00	0.29	0.00	0.14	1.16	0.04	0.15	0.02	1.24
BRU S1 Lat	3.30	0.05	1.00	0.30	0.00	0.13	1.11	0.04	0.16	0.01	1.19
BRU S1 Lat	3.46	0.05	1.00	0.27	0.00	0.12	1.26	0.04	0.16	0.01	1.03

Tableau IV-4 : PNA des éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons des profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat.
PNA : teneurs en éléments normées à la teneur en Al_2O_3 .

A-3-1-2) Profil 06-BRU S3 et BRU S3 Lat

Profils situés sur roche aalénienne supérieure et sous un couvert forestier. Le positionnement des échantillons est rappelé en figure IV-16.

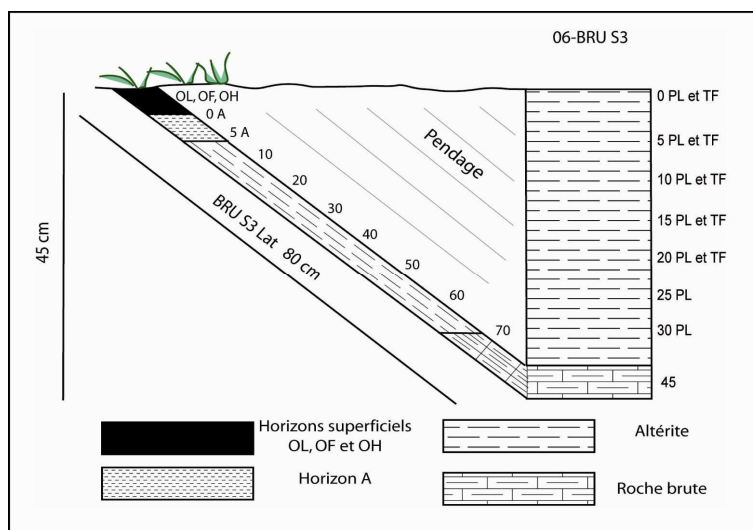


Figure IV-16 : Rappel de la position des échantillons des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat.

Les PNA mesurés sont présentés dans le tableau IV-5.

- **06-BRU S3, échantillons PL** : Les PNA moyens sont de 2,87 pour SiO₂, 2,06 pour CaO, 1,93 pour la perte au feu et 0,39 pour Fe₂O₃.

- **06-BRU S3, échantillons TF** : Les PNA moyens de ces échantillons sont globalement plus faibles que ceux mesurés dans les échantillons PL. Leurs valeurs sont de 2,76 pour SiO₂, 1,77 pour CaO, 1,87 pour la perte au feu et 0,39 pour Fe₂O₃.

- **BRU S3 Lat, échantillons A** : Les PNA moyens des deux échantillons d'horizon A, prélevés à 0 et 5 cm de profondeur, sont de 2.81 pour SiO₂, 2,08 pour CaO, 2,48 pour la perte au feu et 0,39 pour Fe₂O₃.

- **BRU S3 Lat, échantillons PL** : Par rapport aux échantillons sus-jacents (horizon A), ceux prélevés le long de ce profil possèdent des PNA de CaO plus élevés (2,54), tandis les PNA de perte au feu et de Fe₂O₃ sont plus faibles (2,08 et 0,32).

Echantillons	SiO ₂ PNA	TiO ₂ PNA	Al ₂ O ₃ PNA	Fe ₂ O ₃ PNA	MnO PNA	MgO PNA	CaO PNA	Na ₂ O PNA	K ₂ O PNA	P ₂ O ₅ PNA	Perte au feu PNA
06 BRU S3 PL 0 cm	2.83	0.05	1.00	0.40	0.01	0.15	2.00	0.04	0.17	0.00	1.80
06 BRU S3 PL 5 cm	2.88	0.05	1.00	0.41	0.02	0.16	2.01	0.04	0.17	0.00	1.80
06 BRU S3 PL 10 cm	2.85	0.05	1.00	0.41	0.02	0.15	1.96	0.05	0.17	0.01	1.84
06 BRU S3 PL 15 cm	2.94	0.05	1.00	0.40	0.02	0.17	2.17	0.05	0.17	0.00	2.02
06 BRU S3 PL 20 cm	2.88	0.05	1.00	0.38	0.02	0.16	2.16	0.05	0.17	0.01	1.96
06 BRU S3 PL 25 cm	2.89	0.05	1.00	0.40	0.02	0.16	2.09	0.04	0.17	0.01	1.91
06 BRU S3 PL 30 cm	2.83	0.05	1.00	0.34	0.01	0.14	2.03	0.04	0.17	0.00	2.15
06 BRU S3 PL 45 cm	2.87	0.04	1.00	0.35	0.01	0.15	2.04	0.04	0.17	0.00	1.99
Echantillons	SiO ₂ PNA	TiO ₂ PNA	Al ₂ O ₃ PNA	Fe ₂ O ₃ PNA	MnO PNA	MgO PNA	CaO PNA	Na ₂ O PNA	K ₂ O PNA	P ₂ O ₅ PNA	Perte au feu PNA
06 BRU S3 TF 0 cm	2.79	0.04	1.00	0.43	0.01	0.14	1.80	0.04	0.17	0.01	1.84
06 BRU S3 TF 5 cm	2.80	0.04	1.00	0.39	0.02	0.14	1.82	0.04	0.16	0.01	1.83
06 BRU S3 TF 10 cm	2.66	0.04	1.00	0.36	0.01	0.15	1.63	0.04	0.17	0.01	1.80
06 BRU S3 TF 15 cm	2.75	0.04	1.00	0.40	0.02	0.16	1.78	0.04	0.17	0.00	1.98
06 BRU S3 TF 20 cm	2.78	0.04	1.00	0.38	0.02	0.16	1.84	0.04	0.17	0.00	1.90
Echantillons	SiO ₂ PNA	TiO ₂ PNA	Al ₂ O ₃ PNA	Fe ₂ O ₃ PNA	MnO PNA	MgO PNA	CaO PNA	Na ₂ O PNA	K ₂ O PNA	P ₂ O ₅ PNA	Perte au feu PNA
BRU S3 Lat A 0 cm	2.83	0.05	1.00	0.39	0.02	0.14	2.13	0.05	0.18	0.01	2.90
BRU S3 Lat A 5 cm	2.79	0.04	1.00	0.39	0.02	0.13	2.03	0.04	0.18	0.01	2.05
BRU S3 Lat PL 10 cm	2.93	0.05	1.00	0.34	0.02	0.15	2.65	0.05	0.16	0.01	2.21
BRU S3 Lat PL 20 cm	2.88	0.05	1.00	0.31	0.02	0.15	2.58	0.05	0.17	0.00	2.11
BRU S3 Lat PL 30 cm	2.87	0.05	1.00	0.34	0.02	0.16	2.52	0.05	0.16	0.00	2.03
BRU S3 Lat PL 40 cm	2.93	0.05	1.00	0.37	0.02	0.16	2.45	0.04	0.17	0.00	2.03
BRU S3 Lat PL 50 cm	2.88	0.05	1.00	0.25	0.02	0.16	2.51	0.04	0.17	0.00	2.07
BRU S3 Lat PL 60 cm	2.91	0.05	1.00	0.31	0.02	0.16	2.62	0.04	0.17	0.00	2.09
BRU S3 Lat PL 700 cm	2.86	0.05	1.00	0.31	0.01	0.16	2.47	0.05	0.17	0.00	2.04

Tableau IV-5 : PNA des éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat. PNA : teneurs en éléments normées à la teneur en Al₂O₃.

A-3-1-3) Particules fluviatiles

Seuls les deux échantillons de MES du 12/07/2006a et du 24/09/2006 ont été soumis à l'analyse ICP⁴⁸. Les PNA moyens sont de 2,74 pour SiO₂, 1,33 pour CaO, 1,55 pour la perte au feu et 0,33 pour Fe₂O₃ (tableau IV-6).

Echantillons	SiO ₂ PNA	TiO ₂ PNA	Al ₂ O ₃ PNA	Fe ₂ O ₃ PNA	MnO PNA	MgO PNA	CaO PNA	Na ₂ O PNA	K ₂ O PNA	P ₂ O ₅ PNA	Perte au feu PNA
Brusquet MES 12/07/2006a	2.82	0.05	1.00	0.35	0.01	0.14	1.34	0.04	0.17	0.01	1.41
Brusquet MES 24/09/2006	2.67	0.05	1.00	0.31	0.00	0.18	1.33	0.04	0.17	0.01	1.60

Tableau IV-6 : PNA des éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons de particules fluviatiles du Brusquet. PNA : teneurs en éléments normées à la teneur en Al₂O₃.

⁴⁸Cette analyse n'a pas pu être appliquée aux échantillons CF (faute de disponibilité de la machine).

A-3-2) Palynofacies quantitatif

A-3-2-1) Profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat

Les résultats globaux sont présentés dans la figure IV-17 et en annexes 34, 35, 43 et 44.

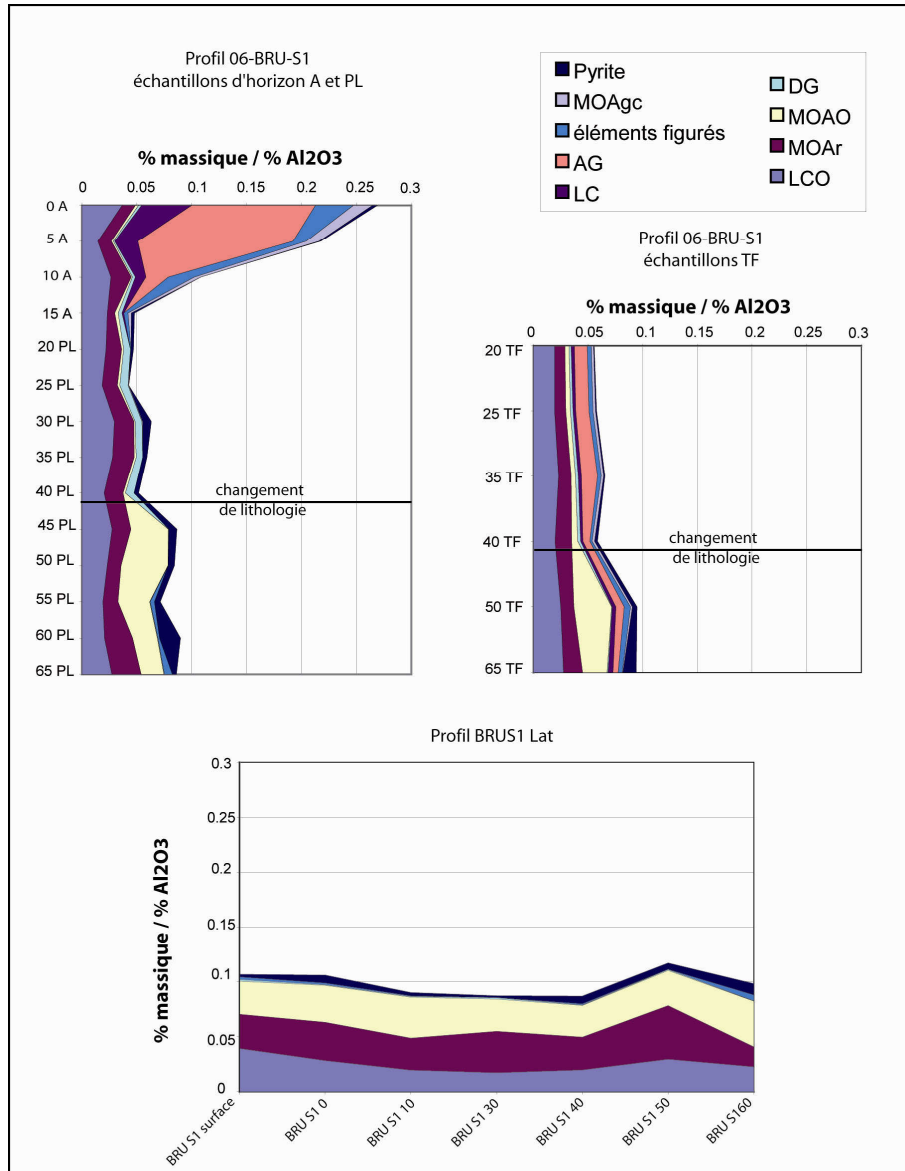


Figure IV-17 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 des particules de la MO et de la pyrite le long des profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat.

- 06-BRU S1, transfert Roches / Altérites (PL) (figure III-18): Sur la partie inférieure du profil (de 65 à 45 cm de profondeur), les PNA de la MOF restent constants lors de la transition Roches / Altérites (de l'ordre de 0,073). Dans le détail, seules les particules de MOAr chutent (de 0,027 à 0,014), tandis que les MOAO augmentent (de 0,021 à 0,043). Les PNA des LCO et DG sont de l'ordre de 0,024 et 0,0005, tandis que ceux de la pyrite oscillent entre 0,004 et 0,019. Entre 45 et 40 cm de profondeur, les PNA de la MOF chutent à 0,050 environ, traduisant le changement de lithologie mis précédemment en évidence. Les PNA de la MOAO chutent vers 0,002 tandis que ceux des DG augmentent pour atteindre 0,007. À partir de ce point, l'ensemble de la MO des échantillons PL reste stable de 40 à 20 cm de profondeur, tandis que la pyrite diminue jusqu'à parfois disparaître (échantillon PL prélevé à 25 cm).

- 06-BRU S1, transfert Altérites (PL) / Sols (Figure III-18) : Les teneurs en MOF semblent légèrement affectées lors de cette transition. Les PNA chutent, en effet, vers une moyenne de 0,042. Cette chute est majoritairement issue -1) d'une chute des PNA des DG (jusqu'à 0,001 pour l'échantillon A prélevé à 5 cm de profondeur) ; et -2) dans une moindre mesure, de la légère et plus variable chute des PNA des MOAr (PNA variant entre 0,007 à 0,019). Les autres particules paraissent plus stables : les PNA des LCO évoluent entre 0,015 et 0,037, et ceux des MOAO oscillent autour de 0,002. La pyrite n'est que peu représentée dans les sols (disparition totale dans l'échantillon prélevé à 10 cm).

Par ailleurs, nous notons que les particules typiques de la MOR sont observées dans chaque échantillon de sol et que leurs teneurs chutent rapidement avec la profondeur. Les PNA cumulés de ces particules passent, en effet, de 0,210 en surface à 0,009 à 15 cm.

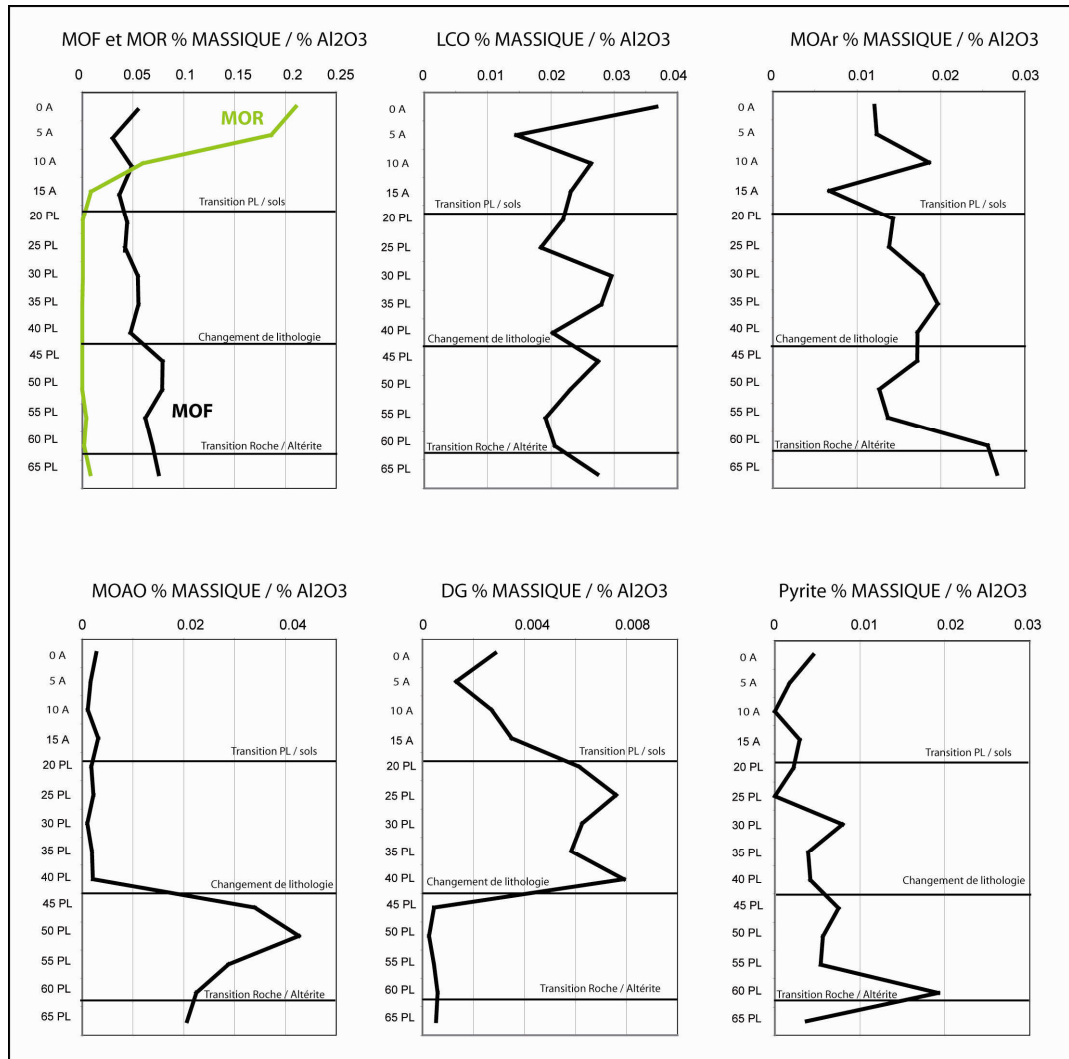


Figure IV-18 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite le long du profil 06-BRU S1, échantillons PL et sols

- **06-BRU S1, transfert Altérites (PL) / Terres fines (TF) (Figure IV-19)** : Les évolutions des PNA de la MOF au sein des échantillons PL et TF sont plus ou moins parallèles et chutent lors du changement de lithologie. Cependant les PNA des échantillons TF sont systématiquement plus faibles que ceux des échantillons PL, et cette différence, de 10 % en profondeur, augmente vers des valeurs proches de 25 % plus en surface. Cette chute paraît issue d'une perte variable en MOAr (de 5,5 et 41 %, moyenne 25 %), mais aussi, et surtout, d'une perte de DG proche de 65 % (de 55 à 69 %). Les PNA de la pyrite sont généralement plus faibles dans les TF que dans les PL, et ils chutent progressivement vers la surface.

La MOR est présente dans l'ensemble des échantillons TF, et les PNA associés chutent légèrement avec la profondeur, de 0,02 vers 0,014 (en moyenne).

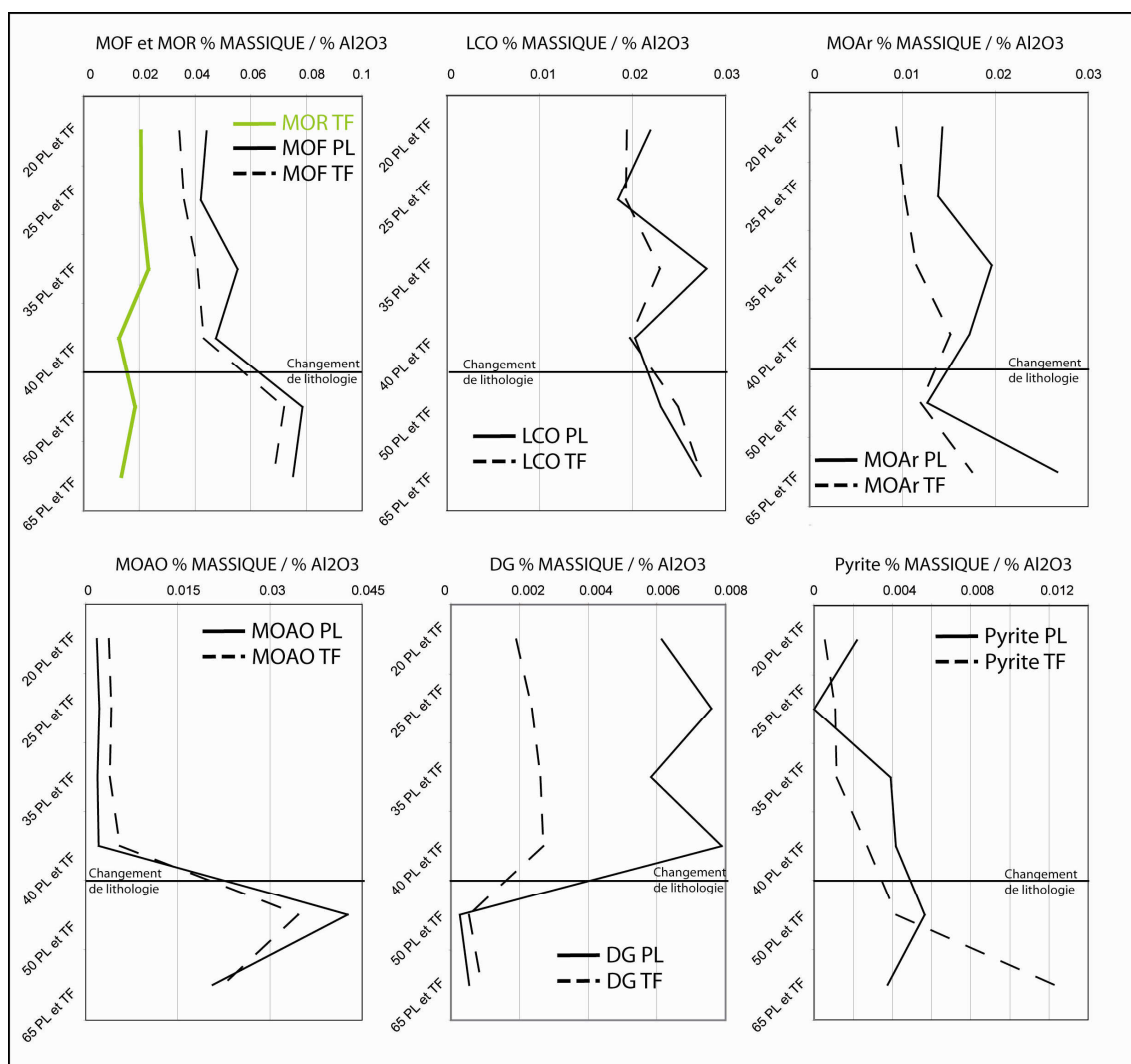


Figure IV-19 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite le long du profil 06-BRU S1, échantillons PL et horizons A.

- **BRU S1 Lat (Figure IV-20)** : Les particules constituant la MOF apparaissent relativement stables le long de ce profil. Les PNA cumulés de la MOF sont de l'ordre de 0,092, et dans le détail, ceux des LCO, MOAr, MOAO et DG oscillent respectivement autour de 0,025 , 0,033 , 0,033 et 0,001. En fait, seuls les PNA de la pyrite connaissent une réelle évolution, se traduisant par une diminution vers la surface (0,010 à 0,002).

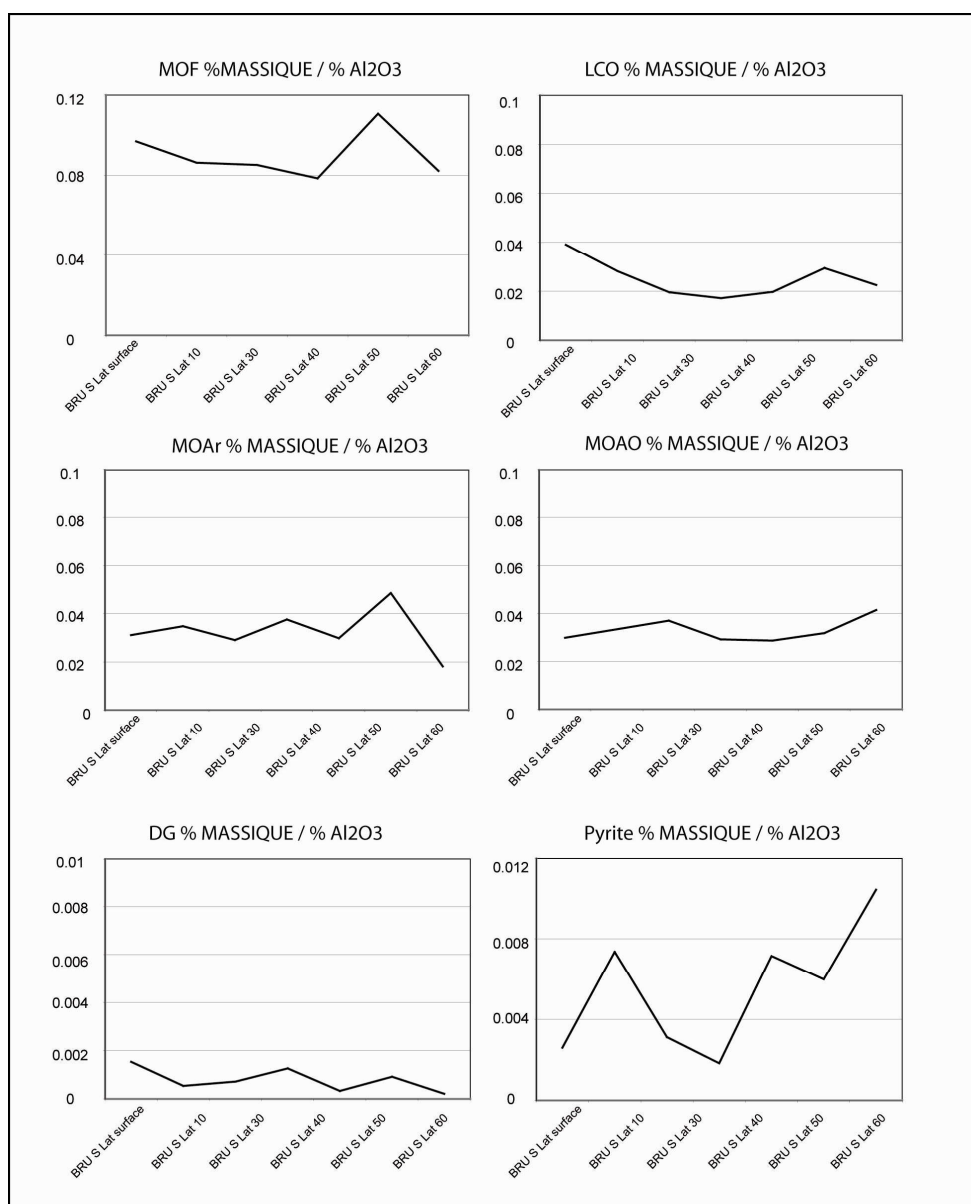


Figure IV-20 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite le long du profil BRU S1 Lat.

A-3-2-2) Profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat

Les résultats globaux sont présentés dans la figure IV-21 et en annexes 36 et 45.

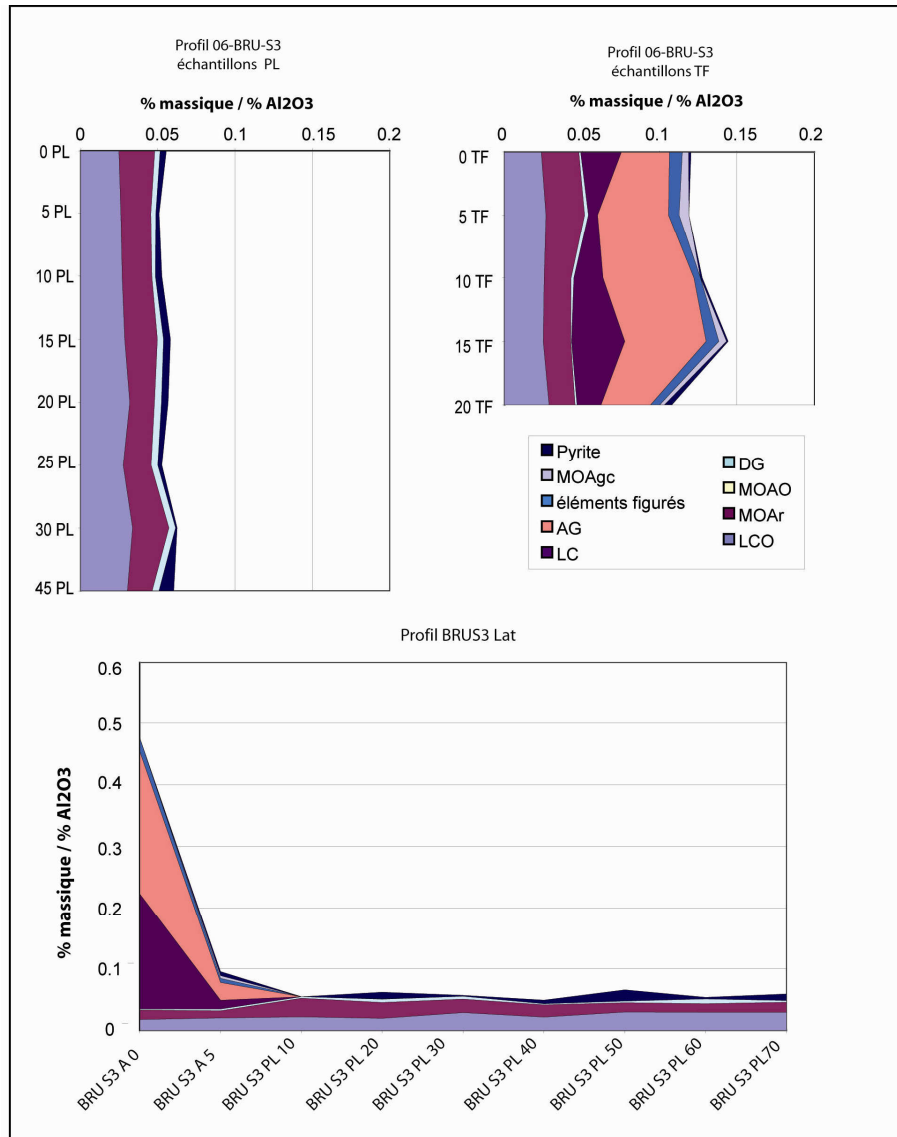


Figure IV-21 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite le long des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat.

- **06-BRU S3, transfert Roches / Altérites (PL) (figure IV-22):** La transition Roche (06-BRU S3 PL 45cm) / Altérites voit une certaine stabilité des PNA de la MOF (0,052). Il semble cependant que les PNA des LCO et DG chutent à partir de 20 cm vers la surface : en moyenne de 0,033 à 0,025 environ et de 0,004 à 0,003. Inversement, les PNA des MOAr présentent, globalement, une légère augmentation (de 0,016 à 0,023). Les PNA de la pyrite chutent par contre brutalement entre 45 et 30 cm de profondeur, de 0,01 vers une moyenne de 0,003.

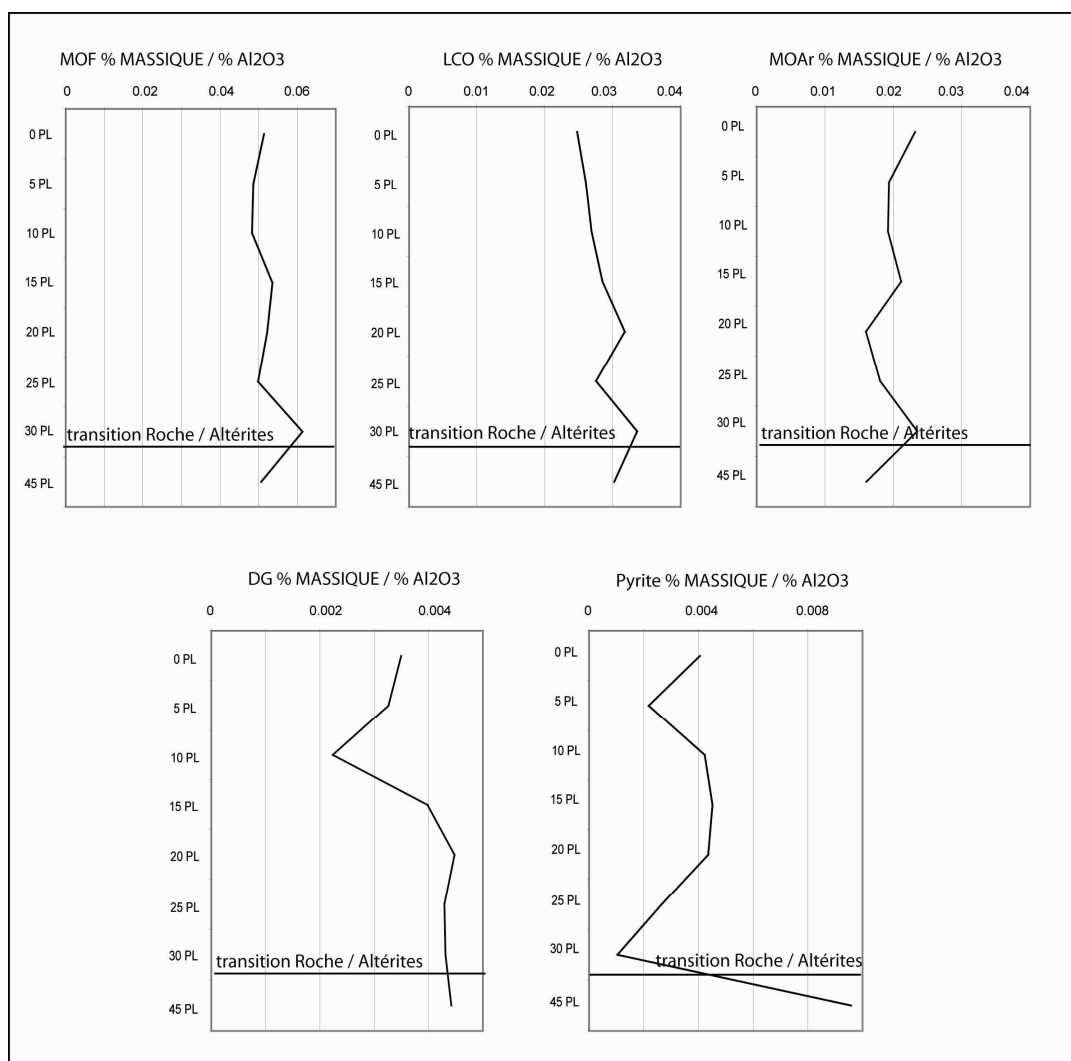


Figure IV-22 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite le long du profil 06-BRU S3, échantillons PL.

- **06-BRU S3, transfert Altérites (échantillons PL) / Echantillons TF (figure IV-23):** Les PNA de la MOF contenue au sein des échantillons PL et TF sont relativement semblables et avoisinent 0,050. Il en va de même pour les PNA des LCO et des MOAr. Les PNA des DG sont par contre systématiquement plus faibles, de 20 à 87 % (54 % en moyenne) dans les échantillons TF que dans les échantillons PL. La même tendance est observée avec la pyrite dont les PNA chutent de 60 à 100 %.

Les particules constituant la MOR (LC, AG, éléments figurés et MOAgc) sont présentes dans tous les échantillons TF, et leurs PNA cumulés évoluent entre 0,065 et 0,104 , sans réelle tendance tout au long du profil.

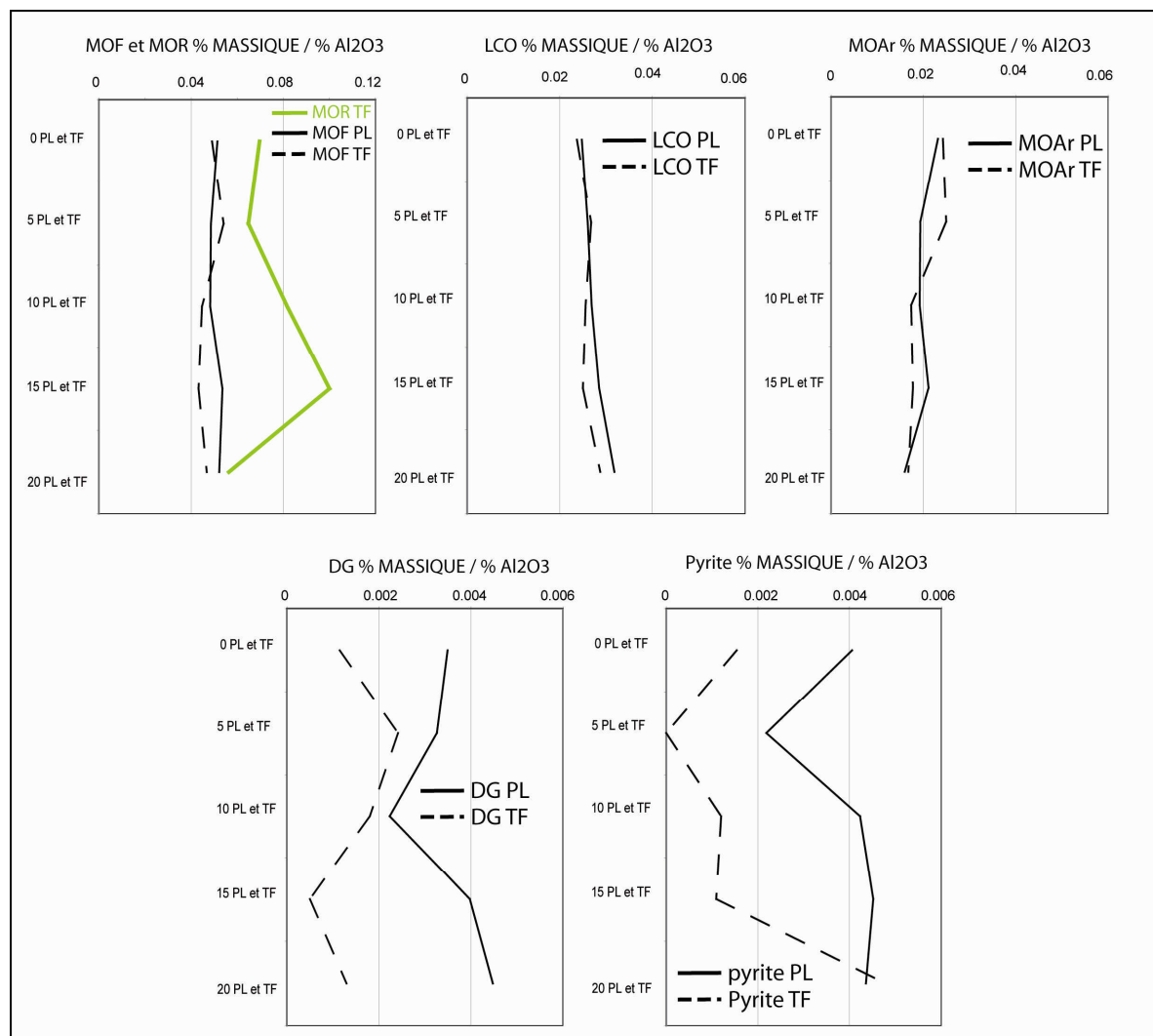


Figure IV-23 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite le long du profil 06-BRU S3, comparaison entre les échantillons PL et TF.

BRU S3 Lat transfert Roches / Altérites (PL) (figure IV-24) : La transition Roches (BRU S3 Lat 70 PL) / Altérites voit les PNA de la MOF rester relativement constants de part et d'autre de cette limite (autour de 0,050). Les PNA des LCO diminuent, de la base du profil, vers la surface (de 0,029 à 0,02 en moyenne), tandis que ceux des MOAr augmentent (de 0,014 à 0,030). Par contre, aucune tendance ne se dégage concernant les PNA des DG dont les valeurs fluctuent entre 0,002 à 0,008. Malgré leur très grande variabilité, de 0 à 0,018, les PNA de la pyrite semblent décroître de la roche vers la surface.

BRU S3 Lat transfert Altérites (PL) / Sols (figure IV-24): Les PNA de la MOF chutent sensiblement lors de cette transition, passant de 0,050 à 0,035 dans les horizons A. cette chute est accompagnée de baisses des PNA de LCO, MOAr et DG vers des valeurs moyennes de 0,019 , 0,014 et 0,002. Les PNA de la pyrite sont faible (0,007 à 5 cm), voire nuls (0 à la surface).

La contribution de MOR est par contre conséquente dans les échantillons d'horizons A, avec des PNA cumulés (particules LC, AG, éléments figurés et MOAgc) atteignant 0,442 et 0,054 à 0 et 5 cm de profondeur. Cette contribution disparaît dans les échantillons PL en profondeur.

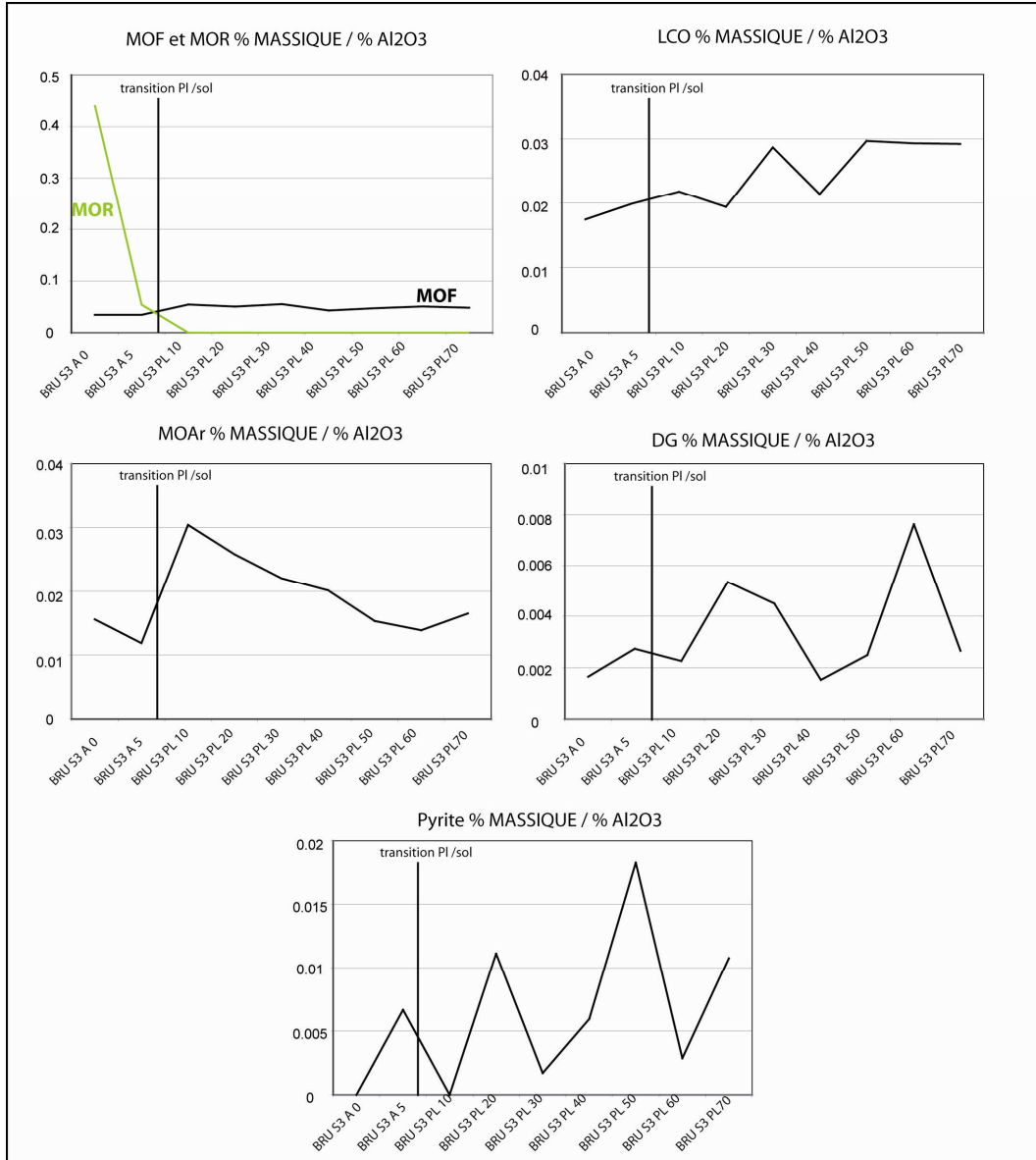


Figure IV- 24: % massiques normés aux % d'Al₂O₃ de la MO et de la pyrite le long du profil BRU S3 Lat, échantillons PL et d'horizons A.

A-3-2-3) Particules fluviatiles du bassin du Brusquet

Les analyses révèlent la présence de MOF et de pyrite en qualité et quantité comparables à celles observées dans les roches et altérites. Les % massiques moyens⁴⁹ en LCO, MOAr, MOAO et DG sont de 0,33 %, 0,2 %, 0,08 % et 0,01 % (Figure IV-25, annexes 37 et 46). Les % massiques de la pyrite varient entre 0,06 et 0,2 %.

Des particules de MOR sont aussi observées dans les échantillons, en proportions variables. Elles sont notamment bien représentées dans les deux échantillons de MES (du 12/07/2006 et du 24/09/2006) et dans l'échantillon CF prélevé le 24/09/1999 où leurs contributions peuvent atteindre 45 % de la MO observée. Elles sont par contre très peu présentes dans les échantillons CF du 20/11/2006⁵⁰.

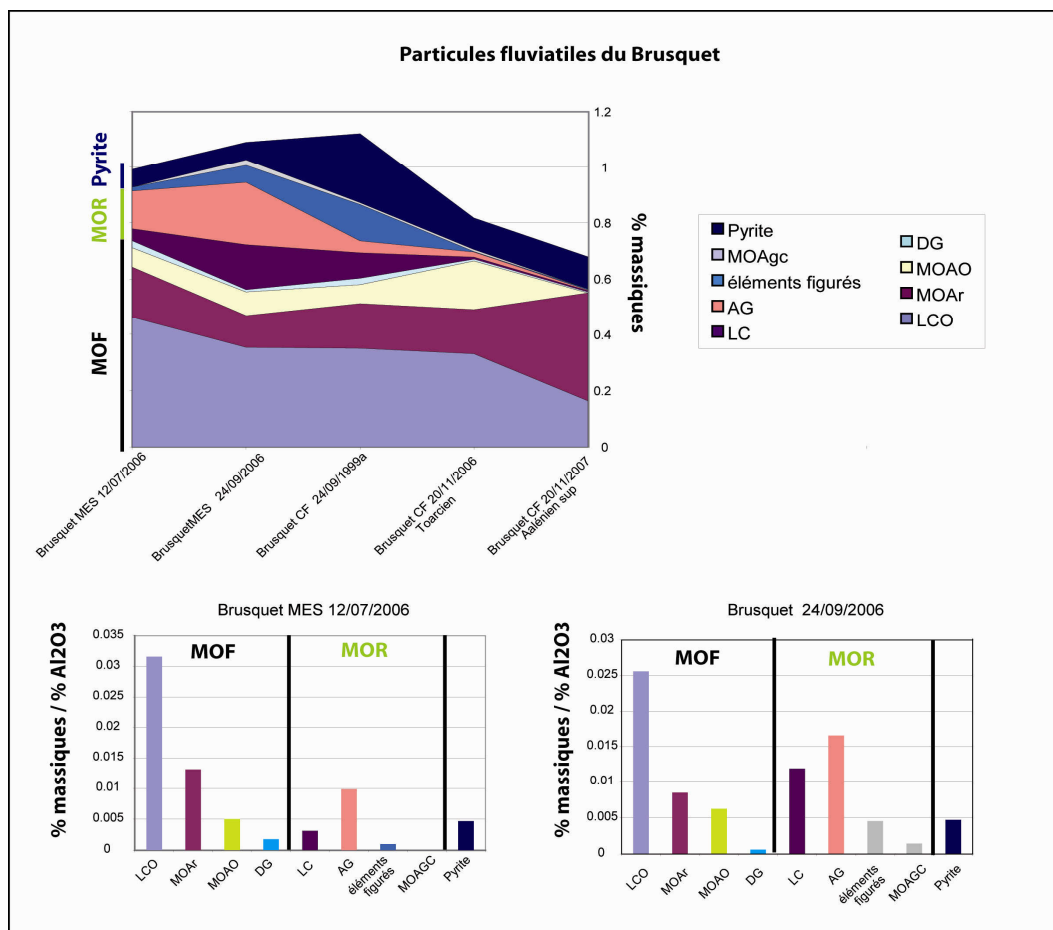


Figure IV-25 : Quantification des particules de MO et de pyrite dans les particules fluviatiles du Brusquet.

⁴⁹ Nous ne possédons les teneurs en Al_2O_3 nécessaires aux calculs des PNA pour les échantillons de CF du Brusquet.

⁵⁰ Notons que ces échantillons ont été prélevés dans des retenues naturelles (barrages végétaux) à l'aval des profils 06-BRU S1 (Toarcien) et 06-BRU S3 (Aalénien supérieur). Leurs contenus organiques semblent similaires à ceux observés dans les roches de ces mêmes profils.

A-4) Résultats : bassin versant du Moulin

A-4-1) Résultats de l'analyse ICP normés aux % Al_2O_3

Les PNA moyens des éléments minéraux au sein des particules fluviales du Moulin (tableau IV-7) sont de 2,53 pour SiO_2 , 1,55 pour la perte au feu et 0,39 pour Fe_2O_3 . Notons que les PNA de CaO sont relativement élevés (en moyenne 1,53) par rapport à ceux mesurés dans les particules fluviales des autres bassins versants.

Echantillons	SiO2 PNA	TiO2 PNA	Al2O3 PNA	Fe2O3 PNA	MnO PNA	MgO PNA	CaO PNA	Na2O PNA	K2O PNA	P2O5 PNA	Perte au feu PNA
Moulin MES 08/09/2006a	2.44	0.04	1.00	0.35	0.01	0.11	1.38	0.03	0.17	0.01	1.43
Moulin MES 24/09/2006	2.64	0.04	1.00	0.43	0.01	0.13	1.72	0.03	0.16	0.01	1.67
Moulin MES 20/10/2006a	2.59	0.04	1.00	0.44	0.01	0.13	1.68	0.03	0.16	0.01	1.65
Moulin MES 07/12/2006	2.51	0.04	1.00	0.40	0.01	0.12	1.45	0.03	0.17	0.01	1.50
Moulin MES 05/06/2007a	2.51	0.04	1.00	0.40	0.01	0.12	1.53	0.03	0.16	0.01	1.53
Moulin MES 23/11/2007	2.57	0.05	1.00	0.37	0.01	0.13	1.54	0.04	0.16	0.01	1.56
Moulin MES 12/01/2008a	2.48	0.04	1.00	0.37	0.01	0.15	1.45	0.04	0.17	0.01	1.49

*Tableau IV-7 : PNA des éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons de particules fluviales du Moulin.
PNA : teneurs en éléments normées à la teneur en Al_2O_3 .*

A-4-2) Palynofacies quantitatif

Les PNA des particules de MOF sont proches de ceux mesurés dans les particules fluviales du Laval (figure IV-26, annexes 37 et 46). La MOR est minoritaire et la contribution fossile représente 82 à 95 % de la MO des échantillons étudiés. Les PNA de la pyrite évoluent entre 0,005 et 0,017.

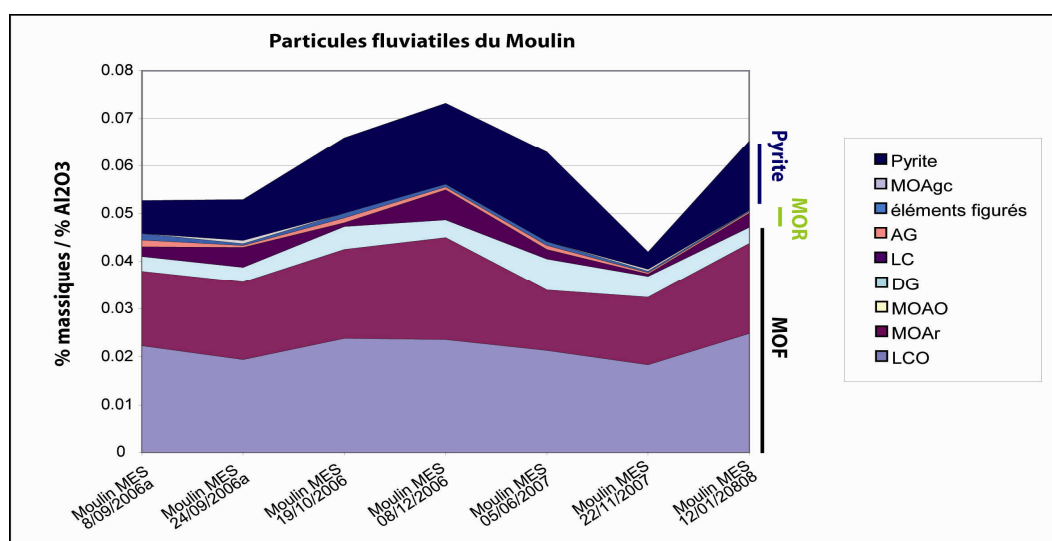


Figure IV-26 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite au sein des particules fluviale du Moulin.

A-5) Bilan

A-5-1) le palynofacies quantitatif : apports, précisions et limites

A-5-1-1) Les apports

Le palynofacies permet d'obtenir des % massiques pour chaque type de MO plutôt que des % surfaciques. L'exemple du profil A-LAV1 illustre bien l'avantage qui en découle (figure IV-27) : le palynofacies « classique » mettait en évidence, de 60 cm vers 6 cm de profondeur, une nette décroissance des % surfaciques des particules typiques de la MOF (LCO, MOAr et DG) au profit des particules de MOR.

Cette décroissance de la MOF pouvait être interprétée de deux façons : -1) comme résultant d'une diminution de la teneur en MOF de la base vers le sommet du profil ; -2) comme l'effet d'une dilution pouvant être induite par une forte contribution de MOR au sommet du profil.

Le palynofacies quantitatif permet de trancher entre ces deux hypothèses. Il montre la relative stabilité des particules LCO, MOAr et DG constitutives de la MOF, ainsi que la labilité de la MOR (chute réelle du sommet à la base du profil).

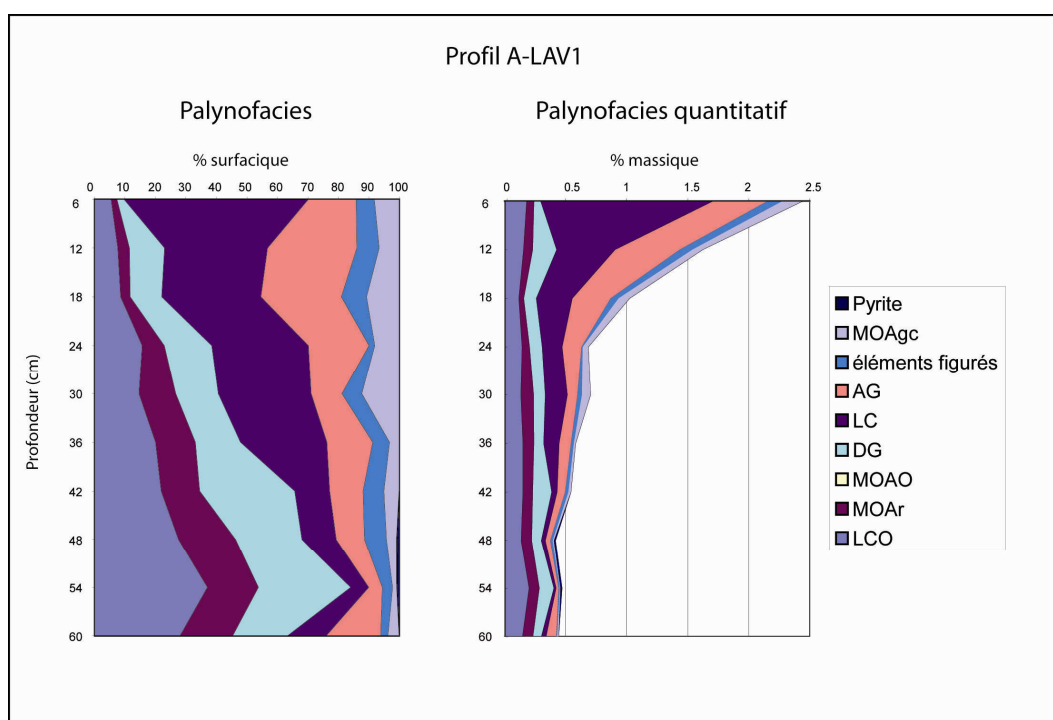


Figure IV-27: Palynofacies classique et quantitatif du profil A-LAV1.

A-5-1-2) Précisions et limites de la méthode

Faute de références dans le domaine, il est assez difficile d'estimer la précision du palynofacies quantitatif. Nous avons cependant tenté de comparer les résultats obtenus par cette méthode avec ceux de la pyrolyse Rock Eval. Ceci nous a amené à discuter du rapport existant, pour nos échantillons, entre le % massique de MO (palynofacies quantitatif) avec le % de Corg (COT, pyrolyse Rock-Eval).

Cas de la MOF :

En première approche, nous avons estimé ce rapport MO / Corg pour les échantillons contenant uniquement des particules appartenant à la MOF, c'est-à-dire les roches et les échantillons de plaquettes. Les rapports estimés sont de $1,31 \pm 0,21$ pour les roches et plaquettes du Callovo-Oxfordien, $1,59 \pm 0,1$ sur roches et plaquettes du Toarcien et $1,79 \pm 0,5$ sur roches et plaquettes de l'Aalénien supérieur.

Nous retiendrons la variation globale des rapports calculés pour l'ensemble des échantillons atteignant seulement 20 %, mais aussi et surtout la faible dispersion de ces rapports pour des substrats identiques. Enfin, le rapport calculé de 1,31 (soit 76 % de Corg au sein de la MO) est parfaitement compatible avec celui d'une MO mature (Rotaru *et al.*, 2006), ce qui valide la méthode du palynofacies quantitatif⁵¹.

Cas de la MOR :

L'estimation de la précision du palynofacies quantitatif pour l'étude de la MOR est plus délicate, notamment en raison de la potentielle évolution du rapport MO / Corg lors de l'altération pédologique de la MO. Nous avons donc tenté d'estimer les COT de nos échantillons en utilisant : -1) les % massique de MO obtenus par palynofacies quantitatif ; -2) les rapports MO / Corg de 1,31 , 1,59 et 1,79 pour les particules de MOF selon la nature du substrat et -3) le rapport MO / Corg de 1,7 annoncé représentatif de la MOR (Duchaufour, 2001).

La corrélation avec les COT mesurés par pyrolyse Rock-Eval semble correcte ($R^2 = 0.90$) avec une erreur moyenne de 20 % (figure IV-28). Cependant, nous notons que pour tous

⁵¹ Les deux autres valeurs plus élevées sont un peu plus surprenantes, notamment si l'on tient compte des faibles valeurs d'IH et d'IO de ces échantillons. Il existe cependant deux moyens d'expliquer cette différence: -1) un rapport surface observée / volume différents pour les particules des différentes formations géologiques ; -2) par des degrés d'associations minérales / MO différents au sein des particules amorphes. Il est impossible de conclure.

les échantillons contenant une part importante de MOR (COT >0,9 %), les valeurs calculées sont systématiquement inférieures à celles mesurées par pyrolyse Rock-Eval. Cette sous estimation peut s'expliquer de plusieurs façons : -1) les particules de MOR sont trop volumineuses pour que le standard rende compte de leurs volumes ; -2) la MOR contient plus de composés acido-solubles que la MOF et ceux-ci sont perdus lors de la préparation des concentrés organiques ; -3) la MOR est généralement moins dense que la MOF et une part du matériel a pu être perdue durant la préparation.

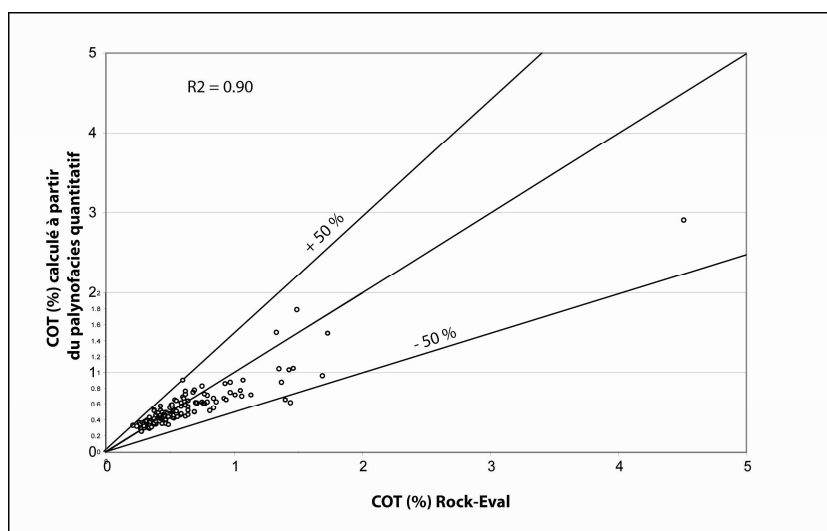


Figure IV-28 : Confrontation des COT calculés à partir des résultats du palynofacies quantitatif et de COT mesurés par pyrolyse Rock-Eval. Echantillons du Brusquet et du Moulin.

En résumé, le palynofacies quantitatif permet un réel suivi des % massique des particules de MOF dans les différents échantillons, avec une erreur de l'ordre de ± 20 %. La quantification de la MOR par ce moyen se révèle par contre plus risquée. Il semble, en effet, que nous sous-estimions presque systématiquement sa contribution. Cela ne pose pas de réel problème pour notre étude, qui s'intéresse en premier lieu à la MOF, mais cela montre que la méthode doit être améliorée pour les études s'intéressant plus spécifiquement à la MOR. Le choix de standards différents, et de plus grandes dimensions (tels certains charbons) est une solution envisageable.

A-5-2) Validation des compartiments Roches, Altérites Sols et Particules fluviatiles

L'étude du transfert de MOF entre les Roches, Altérites, Sols et Particules fluviatiles nécessite une réelle caractérisation et définition de ces compartiments. Celles que nous avons initialement établies étaient fondées sur les observations de terrain et nous les confrontons aux données analytiques obtenues en laboratoire (ICP, quantification de la pyrite).

A-5-2-1) Observations sur le terrain

Notre définition des compartiments Roches, Altérites et Sols s'est appuyée sur les descriptions détaillées de la frange d'altération des bassins de Draix (Maquaire *et al*, 2002 ; Mathys, 2006), ainsi que sur nos propres observations.

- **Roches** : Les échantillons de marnes structurés et cohésifs prélevés à la base des profils représentent la roche intacte.
- **Altérites (PL)** : Les échantillons PL d'altérites sont constitués de plaquettes de marnes relativement friables situées au dessus du compartiment Roche. Ces plaquettes, généralement nommées régolites⁵², peuvent conserver la structure de la marne tout en perdant sa cohésion du fait de l'ouverture des plans de schistosité (Mathys 2006).
- **Altérites (TF)** : Les échantillons de terres fines (TF) sont constitués d'une phase argileuse et friable. Ils ne sont présents que dans les profils prélevés sous végétation et leur occurrence tend à diminuer avec la profondeur. Nous observons en général des traces d'activité biologique en leur sein (fragments de végétaux notamment).
- **Sols** : La transition Altérites / Sols est très bien marquée par la disparition des plaquettes de marnes au profit d'une phase argileuse meuble comparable (en aspect) aux terres fines. Sur l'ensemble de nos profils, cette phase est interprétée comme un horizon A.
- **Particules Fluviatiles** : Ces échantillons sont directement prélevés dans le lit des rivières (CF), ou en suspension dans les eaux.

⁵²Couverture constituée de débris de la dégradation des roches de surface, et qui finit par les recouvrir (synonyme d'altérite).

A-5-2-2) Evolution de la phase minérale d'un compartiment à l'autre

- **Le transfert Roches / Altérites (PL)** : Les résultats obtenus par ICP ne témoignent pas d'un changement significatif de composition de part et d'autre de cette transition, excepté pour le profil BRU S1 Lat. Celui-ci est marqué par nette diminution des PNA du CaO le long de la lamine (de 1,12 à 0,87), qui confirme l'altération possible de la phase minérale lors du transfert Roches / Altérites.

Nous remarquons parallèlement que le transfert Roches / PL du profil 06-LA-A est aussi marqué par une diminution progressive des PNA du CaO (de 1,58 à 0,86). Cette chute pouvant, de premier abord, être interprétée comme une dissolution progressive de la calcite des roches vers les altérites doit, en fait, être associée à un changement de lithologie (figure IV-29). Après correction, nous observons que les six mois passés entre les échantillonnages des profils 06-LA A et LA A R ont suffi pour permettre une altération significative de la phase minérale : les PNA du CaO et du SiO₂ ont, en effet, chuté de 4 à 16 %.

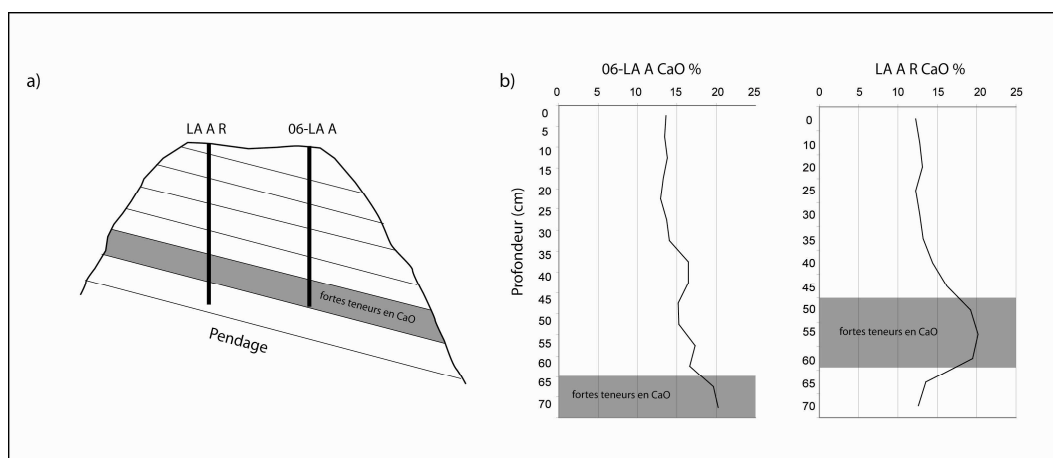


Figure IV-29: Décalage entre les profils 06-LA A et LA A R :

- a) représentation schématique du décalage ;*
- b) décalage des CaO % entre les deux profils.*

-Le transfert Altérites (PL) / Terres Fines : Nous remarquons, dans les profils 06-BRU S1 et 06-BRU S3 une nette diminution des PNA de CaO (de 1,37 à 0,98 sur les quarante premiers cm du profil 06-BRU S1 et de 2,06 à 1,77 le long du profil 06-BRU S3) et de SiO₂ (respectivement de 3,55 à 3,32 et de 2,87 à 2,76). Ce transfert semble donc être le lieu d'une altération de la phase minérale, et notamment d'une décarbonatation.

Mentionnons par ailleurs le cas du profil 06-LA S2 qui se caractérise, lui, par une augmentation des PNA du CaO (en moyenne de 0,88 à 0,98) et du SiO₂ (en moyenne de 2,73 à 2,90). Ces résultats surprenants peuvent être interprétés comme la conséquence d'une éventuelle dissolution de ces éléments en surface, suivies de leur re-précipitation en profondeur. Les échantillons PL de surface possèdent effectivement les plus faibles PNA en CaO et SiO₂ du profil d'altérites (environ 2,60 et 0,70).

-Le transfert Altérites (PL) / Sols (horizons A) : Nous ne notons pas de changement significatif de la composition de la phase minérale lors de ce transfert pour les profils 06-LA S2 et 06-BRU S1.

Cependant, dans le cas du profil BRU S3 Lat, la transition PL / Sols (horizon A) est marquée par une très forte chute des PNA en CaO (2,54 à 2,08) témoignant d'une décarbonatation.

-Le transfert Roches / Particules fluviatiles : Compte tenu des changements de lithologie observés au sein des profils étudiés, il est difficile de faire le lien direct entre les roches et particules fluviatiles. Notons simplement que les PNA mesurés au sein de ces échantillons sont parfaitement compatibles avec ceux mesurés dans les différentes roches des bassins versants.

A-5-2-3) Evolution de la concentration en pyrite

Des particules de pyrite sont systématiquement observées dans les roches étudiées. Leur contribution diminue par contre significativement dès le transfert vers les altérites (PL) pour parfois devenir nulle dans les échantillons de terres fines et d'horizons A. Cette disparition témoigne de phénomènes d'altération dans l'ensemble des compartiments étudiés.

Par contre, leur observation systématique dans les échantillons de particules fluviatiles témoigne du transfert direct du matériel érodé, des roches vers les rivières. Ceci confirme les résultats d'études antérieures sur le bassin du Moulin (Di-Giovanni *et al*, 1999a).

A-5-2-4) Définition des compartiments étudiés

Compte tenu de ces résultats, notre première définition visuelle des différents compartiments apparaît comme justifiée et peut se résumer de la façon suivante (tableau IV-8).

Compartiment	Observation sur le terrain	Analyse ICP	Quantification de la pyrite
Sols	-Phase argileuse meuble -Traces d'activité biologique	-Perte possible de carbonates selon le profil étudié	-Pyrite en faible proportion, voire absente
Altérites Plaquettes Terres fines	- Plaquettes de marnes friables -Phase argileuse meuble -Traces d'activité biologique (racines)	- Perte possible de carbonate, voire de silice selon le profil étudié - Perte possible de carbonate, voire de silice selon le profil étudié	- Altération progressive de la pyrite -Pyrite en faible proportion, voire absente
Roches	-Marnes compactes structurées et cohésives	-Teneurs en éléments majeurs variables selon la lithologie	- Présence systématique de pyrite
Particules fluviales	- Récoltées dans le lit des rivières, ou en suspension dans les eaux	-Teneurs en éléments majeurs proches de celles des roches	- Présence systématique de pyrite

Tableau IV-8: Définition des compartiments étudiés.

A-5-3) Pertes en MOF lors des transferts entre compartiments

A-5-3-1) Le transfert Roches / Altérites

Ce transfert ne semble pas être le lieu de pertes significatives de MOF. Les PNA des particules LCO, MOAr et DG restent constants le long des échantillons PL des profils 06-LA A, 06-LA S2, 06-BRU S1 et BRU S1 Lat. Par contre, la pyrite perd progressivement jusqu'à 60 % voire 100 % de sa masse, ce qui témoigne de sa plus grande labilité.

Deux points peuvent cependant être mis en avant :

- 1) Nous observons une baisse des PNA des DG au sein des échantillons PL du profil 06-BRU S3 à 20 cm de profondeur, tandis que les autres particules restent stables. Ces résultats montrent que les DG sont plus sensibles à l'altération que les autres particules de MOF.
- 2) La perte en LCO de l'ordre 0,01 PNA le long de la lamine du profil BRU S3 Lat, est compensée par un gain de valeur identique en MOAr. Ce résultat suggère que la MOF peut se transformer et s'amorphiser le long des profils d'altération⁵³.

A-5-3-2) Le transfert Altérites (PL) / Terres fines

Ce transfert semble par contre le lieu d'une perte significative de MOF, atteignant jusqu'à 28 % environ de la masse sur le haut du profil 06-LA S2, et de 10 à 25% le long du profil 06-BRU S1. Cette perte n'affecte cependant pas tous les types de particules de la même manière car elle concerne plus particulièrement les DG, et dans une moindre mesure les MOAr. En effet, les pertes moyennes en DG atteignent, selon le profil étudié, 43 % (moyenne sur le haut du profil 06-LA S2), 65 % (06-BRU S1) et 54 % (06-BRU S3) de la masse initiale, tandis que les pertes en MOAr sont de 39 % sur le haut du profil 06-LA S2, 25 % long du profil 06-BRU S1, et nulles le long du profil 06-BRU S3. Les LCO semblent les particules les plus résistantes car elles ne perdent que 13 % de leur masse sur le haut du profil 06-LA S2. Les pertes en pyrite sont, quand à elles, variables et peuvent atteindre 100%.

⁵³ Il semble par ailleurs que le phénomène, bien que moins net, soit aussi observé le long du profil 06-BRU S3.

A-5-3-3) Le transfert Altérites / Sols

Ce transfert, dominé par les altérations (bio)chimiques, semble aussi être le lieu d'une perte significative de MOF. Elles atteignent 30, 16 et 32 % pour les profils 06-LA S2, 06-BRU S1 et BR S3 Lat. Ici encore, toutes les particules ne sont pas affectées de la même façon. Sont principalement concernés les DG (36, 62 et 42 % en moyenne), les MOAr (35, 25 et 55 %) et dans une moindre mesure les LCO (20 et 16 %). Une nouvelle fois, les pertes en pyrite sont variables mais importantes (jusqu'à 100 %).

A-5-3-4) Le transfert Roches / Particules fluviatiles

Aucune perte de MOF ne semble être effective lors de ce transfert pour l'ensemble des échantillons étudiés (Laval, Moulin et Brusquet). Les concentrations en particules de MOF (LCO, MOAr, MOAO et DG) et de pyrite sont du même ordre de grandeur que celles observées dans les roches.

A-5-3-5) Altération d'un profil 'in situ' (profils 06-LA A et LA A R)

Les profils 06-LA A et LA A R sont situés au même endroit, mais les échantillons ont été prélevés à six mois d'intervalle⁵⁴. Sur ce court laps de temps, nous observons des pertes de 16 % de CaO, de 83 % de pyrite et de 20 % de DG (soit 0,0022 PNA). Parallèlement les LCO augmentent de 6 % en moyenne (soit 0,017 PNA), compensant, en partie, les pertes en DG. Les conclusions sont multiples :

- l'altération naturelle parvient, en six mois seulement, à engendrer un début de décarbonatation associée à une perte significative en pyrite ;
- les différents types de particules organiques réagissent différemment. Nous notons une perte en DG pouvant être interprétée de deux façon : -1) une minéralisation et/ou dissolution de ces particules, ou -2) une transformation en LCO par oxydation et opacification.

⁵⁴ Les échantillons du premier profil (06-LA A) ont été prélevés immédiatement après creusement. Les échantillons du second profil (LA A R) ont été prélevés après six mois d'exposition à l'air libre.

A-5-4) Evolution de la MOR

Bien que l'étude de la MOR ne constitue pas l'objectif premier de ce travail, les résultats obtenus nous permettent de conclure de la façon suivante.

La MOR apparaît comme fortement labile, et les pertes massiques, bien que progressives, sont importantes, voire totales des humus vers les horizons A, puis terres fines. Ces pertes affectent l'ensemble des particules, mais nous notons parallèlement une augmentation relative des AG des humus vers les terres fines (10 % de la MO dans les humus ; 60 à 70 % dans les terres fines). Celle-ci peut traduire -1) soit une résistance relative plus importante de ces particules en regard des autres particules constituant la MOR ; -2) soit le résultat d'une transformation des autres particules lors de l'altération pédologique, comme cela a été suggéré (mais non prouvé) lors de travaux antérieurs (Lallier-Verges *et al*, 1993 ; Sebag *et al*, 2006).

A-6) Conclusion

Le palynofacies quantitatif se révèle être une méthode adaptée au suivi de la MOF lors de son transfert entre compartiments. Cette technique permet à la fois de discriminer les particules de MOF de celles de MOR, mais elle permet aussi une réelle quantification de leurs masses au sein des compartiments étudiés (erreur +/- 20 %). Elle permet ainsi de mettre en évidence la résistance aux altérations de la MOF, face à l'importante labilité de la MOR.

Les pertes de MOF ont pu être quantifiées, et il apparaît que ces dernières sont dépendantes, -1) du type d'altération (ou type de transfert), mais aussi -2) de la nature de la MOF (tableau IV- 9). En détail, les pertes sont nulles ou négligeables lors des transferts Roches / Altérites (altération chimique), et Roches / Particules fluviatiles (altération mécanique). Elles sont par contre nettement plus importantes lors des transferts Altérites / Terres fines et Altérites / Sols (altérations (bio)chimiques) atteignant, voire dépassant, 30 % de la masse initiale de MOF.

De plus, les différentes particules semblent réagir différemment face à ces altérations. De la plus résistante à la plus labile nous observons :

- les LCO, dont les pertes maximales n'excèdent pas 20 % lors des transferts Altérites / Terres fines et Altérites / Sols ;
- les MOAr, dont les pertes peuvent atteindre 39 et 55 % ;
- les DG, dont les pertes peuvent dépasser 60 % lors de ces mêmes transferts. Ces DG sont d'ailleurs les seules particules qui apparaissent sensibles à la transition Roche / Altérite (profil 06-BRU S3) ou qui subissent des pertes conséquentes (20 %) durant six mois d'exposition aux altérations supergènes (profils 06-LA A et LA A R) ;
- la pyrite, dont les pertes sont systématiquement plus importantes que celles de toutes autres particules, quelque soit le transfert. Ces particules peuvent parfois totalement disparaître lors des transferts Altérites / Terres fines et Altérites / Sols.

Nous notons, enfin, des possibilités de transformation de particules. Ainsi, certains LCO pourraient s'amorphiser en particules semblables aux MOAr⁵⁵ (profil BRU S3 Lat) et certains DG pourraient s'oxyder et s'opacifier en LCO (profils 06-LA A et LA A R).

MOF	Transition Roche / Altérites (PL)	Transition Altérites / Terres fines	Transition Altérites (PL) / Horizon A	Transition Roche / Particules fluviales	Altération 'in situ' 06-LA A / LA A R
LCO	- ? <small>amorphisation parfois observée (profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat)</small>	-	-	=	+
MOAR	+ ?	--	---	=	=
DG	-	----	----	=	-
Pyrite	---	-----	-----	=	----
Pertes massiques globales	Peu ou pas de pertes de MO	Pertes de 8 à 28% de la MO	Pertes de 16 à 32% de la MO	Peu ou pas de pertes de MO	Peu ou pas de pertes de MO

Tableau IV-9 : récapitulatif des pertes observées durant les transitions entre compartiments sur le terrain, les - traduisent l'intensité des pertes et les + celle des apparitions.

⁵⁵Certaines MOAr des échantillons du profil BRU S3 Lat se distinguent des autres par la présence des fragments de particules réfléchissantes visibles en lumière réfléchie (cf. § III-D-2-1).

B) Déggradations expérimentales

de la matière organique

Les résultats « sur le terrain » permettent de proposer une première classification des particules, en termes de pertes, et suggèrent des possibilités de transformation d'un type de MO à un autre. Ils ne permettent cependant en aucun cas de traduire les « pertes massique » en terme de minéralisation, ou dissolution.

Trois processus principaux sont susceptibles d'altérer la MO en conditions naturelles : l'activité biologique, l'hydrolyse et l'oxydation. Nous avons donc choisi de les reproduire expérimentalement en soumettant deux grammes de concentrés organiques représentatifs de la MOF et de la MOR à ces investigations. L'échantillon de MOF est issu de la roche brute callovo-oxfordienne prélevée au fond du profil 06-LA S2 (06-LA S2 PL 135 cm). Il a été sélectionné car il possède des % massiques de LCO, DG et MOAr plus équilibrés que ceux des roches datées du Toarcien et de l'Aalénien supérieur. L'échantillon de MOR est issu de l'horizon OL coiffant ce même profil.

L'évolution temporelle de l'altération des particules organiques a été simulée en soumettant 5 exemplaires d'un même échantillon à chaque dégradation (prélèvements mensuels à 1, 2, 3, 4 et 5 mois). Les produits de dégradation ont été séchés, pesés et ensuite soumis au palynofacies (qualitatif pour la MOR et quantitatif pour la MOF), à la pyrolyse Rock Eval (MOF uniquement) et à la mesure des pouvoirs réflecteurs.

B-1) Protocoles expérimentaux

B-1-1) Dégradation bactérienne

Chaque échantillon a été soumis au test DBO (Demande Biochimique en Oxygène), classiquement utilisé pour simuler la dégradation naturelle de la MO dissoute ou en suspension dans l'eau sous l'action des bactéries (Rodier, 1996). Ce test consiste en la mesure de la quantité de dioxygène nécessaire aux micro-organismes aérobies de l'eau pour oxyder la MO durant un temps défini. Ce test, généralement considéré comme indicateur de la teneur en MO biodégradable d'une eau, est réalisé en milieu fermé (eau + air), à l'obscurité et à température constante (20°C) (Lin, 1988, Albéric 1998).

Le protocole est le suivant :

- deux grammes d'échantillon sont placés dans un flacon de 510 ml avec 432 ml d'eau distillée. Nous ajoutons à cette solution deux capsules de sels nutritifs HACH (afin que le facteur limitant de l'activité bactérienne soit le Corg) et 300 µl de suspension de bactéries (Bacta-purTM XLG) ;
- afin d'absorber le CO₂ dégagé durant la respiration, deux pastilles de soude sont placées dans un godet situé au niveau du goulot du flacon. La mesure de la quantité d'oxygène consommé est effectuée à l'aide de respiromètres (système Oxitop ® WTW).
- les eaux sont récupérées à la fin de chaque analyse et filtrées afin de permettre le dosage de carbone organique dissous (COD, sur Shimazu TOC 5000).

Les analyses sont standardisées par rapport à une solution de référence de 23mg/l de glucose, correspondant à une DBO théorique de 17 mg d'O₂ par litre (Rodier, 1996).

B-1-2) Oxydation

Le protocole suivi a pour but de simuler l'oxydation aérienne naturelle susceptible d'être effective à l'affleurement. Pour cela nous avons placé 2 grammes d'échantillons dans des coupelles en aluminium au sein d'une étuve ventilée sous balayage d'air sec. Nous avons fixé la température de l'expérience à 125°C afin d'éviter une éventuelle évolution thermique trop importante de la MOF. Celle-ci devenant en effet significative à partir de 150°C, (Copard, 2002).

B-1-3) Hydrolyse

Le protocole suivi est censé simuler l'hydrolyse de la MO par les eaux. Afin d'en accélérer l'effet, 2 grammes d'échantillon ont été placés, avec 10 ml d'eau minéralisé au sein d'une autoclave de 43 cm³ à 125°C. Les eaux, récupérées à la fin de chaque analyse, ont été filtrées afin de permettre le dosage de carbone organique dissous.

B-2) Résultats des dégradations expérimentales de la MOF

B-2-1) Dégradation bactérienne

B-2-1-1) Signature des bactéries : pyrolyse Rock-Eval et palynofacies

Sachant que l'introduction de bactéries constitue un apport de MO dans les échantillons étudiés, il convient de contrôler si ces dernières peuvent être confondues avec les MO étudiées.

Notons tout d'abord qu'une très faible quantité de bactérie a été injectée dans chaque échantillon (moins de 2mg, poids sec), comparativement aux 80mg et 2000mg, environ, de MOF et de MOR utilisés.

Une partie de cette suspension a été filtrée et le filtre récupéré pour être soumis à la pyrolyse Rock-Eval. Cette analyse révèle que les bactéries sont riches en hydrogène (IH de 273 mg HC.g⁻¹COT) et en oxygène (273 mg CO₂. g⁻¹COT) –Tableau IV-10).

	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
Bactéries	1.79	423	377	273	0.76	1.03

Tableau IV-10 : Paramètres Rock-Eval des bactéries Bacta-purTM XLG.

Montées entre lame et lamelle, ces bactéries se présentent sous la forme d'amas de fines baguettes (figure IV-30).

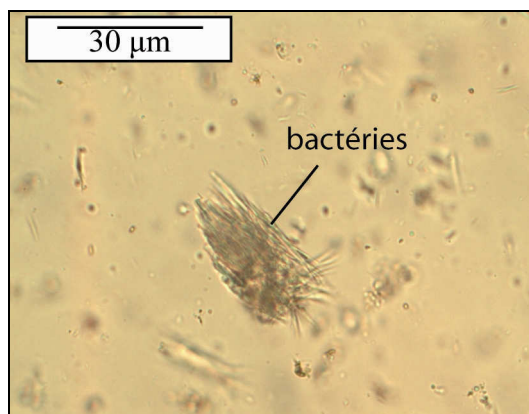


Figure IV-30 : Aspect des bactéries Bacta-purTM XLG (lumière transmise).

Ainsi, de part leur faible quantité, leur aspect et leur signature Rock-Eval, nous considérons que ces bactéries ne peuvent être confondues avec les MO étudiées. Un seul point commun peut être retenu : leur signature Rock-Eval paraît être proche de celle de la MOR.

B-2-1-2) Pesées des produits de dégradation

Les pertes en poids des produits de dégradation constatés durant l'altération bactérienne sont faibles et évoluent entre 0 et 8,80 % (tableau IV-11). Notons, cependant, la très légère augmentation du poids pour l'échantillon de 4 mois, dont la valeur (-1,02 %) n'apparaît pas réellement significative.

DBO	Concentré initial	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
Poids initial (g)	1.96	1.91	1.97	1.97	1.96	2.16
Poids final (g)		1.91	1.89	1.83	1.98	1.97
Pertes en poids (%)		0.00	4.06	7.11	-1.02	8.80
COT (%)	3.37	3.53	3.37	3.45	3.34	3.32
IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	14.00	27.00	18.00	22.00	19.00	14.00
IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	36.00	49.00	42.00	49.00	42.00	49.00
PC (%)	0.11	0.18	0.13	0.16	0.16	0.13
RC (%)	3.26	3.35	3.24	3.29	3.18	3.19
Pertes en TOC (%)		-4.75	4.06	4.90	-0.12	10.15

Tableau IV-11: Pesées et paramètres Rock-Eval des produits de la dégradation bactérienne de concentrés organiques de roche brute.

B-2-1-3) Evolution des paramètres Rock-Eval et calcul des pertes en Corg

Evolution des paramètres Rock-Eval (tableau IV-11) : L'IH est extrêmement faible, mais il semble très légèrement augmenter pendant le premier mois de dégradation (de 14 à 27 mg HC.g⁻¹COT). Il chute ensuite rapidement vers des valeurs comprises entre 14 et 22 mg HC.g⁻¹COT.

Le paramètre IO augmente très légèrement, de 36 à 49 mg de CO₂.g⁻¹ COT, dès le premier mois d'expérimentation. Il oscille durant les mois suivants entre 42 et 49 mg de CO₂.g⁻¹ COT.

Les paramètres RC et PC n'évoluent pas de façon notable durant les 5 mois de dégradation.

Il en va de même pour le COT (%), bien que celui-ci présente une très légère augmentation durant le premier mois (de 3,37 à 3,53 %).

Calcul des pertes en Corg : L'estimation des pertes en Corg pourrait être simplement appréhendée à partir des variations de COT (%) au cours des cinq mois de dégradation. Une telle estimation serait valide si la phase minérale, qui a déjà subi une succession d'attaques acides durant la préparation des échantillons, était stable durant l'expérimentation. L'augmentation du COT (%) parfois observée durant le traitement DBO (mais aussi durant l'oxydation et l'hydrolyse ; cf. paragraphes suivants) suggère une surconcentration relative de la MO, et de fait, une possible diminution de la phase minérale.

Devant ce doute, les COT (%) de nos échantillons ont été corrigés, c'est-à-dire ramenés au poids initial des échantillons avant traitement⁵⁶. Les pertes en Corg ont alors été calculées de la façon suivante⁵⁷ :

$$\text{eq 4) Pertes en Corg (\%)} = \frac{(\text{COTi} \times \text{Pi}) - (\text{COTf} \times \text{Pf})}{(\text{COTi} \times \text{Pi})} \times 100$$

Où COTi et Pi sont les COT et poids du concentré initial et ou COTf et Pf sont les COT et poids du produit d'altération.

Les pertes de Corg ainsi calculées (tableau IV-11) apparaissent faibles durant les 4 premiers mois de dégradation bactérienne. Elles deviennent, par contre, significatives au bout de 5 mois en atteignant 10,15 %⁵⁸.

⁵⁶ Avec prise en compte des pertes massiques mesurées entre les échantillons initiaux et les produits d'altération.

⁵⁷ Le même calcul sera effectué pour l'oxydation et l'hydrolyses.

⁵⁸ Considérant les éventuelles pertes mécaniques de matériel durant l'expérimentation, nous considérons que les pertes estimées sont des maximums.

B-2-1-4) Mesure de la DBO

Les valeurs de DBO augmentent sensiblement durant les 5 mois d'expérimentation. 38, 47, 69, 79 et 93 mg d'O₂/l⁻¹ ont ainsi été consommés au bout de 1, 2, 3, 4 et 5 mois (figure IV-31).

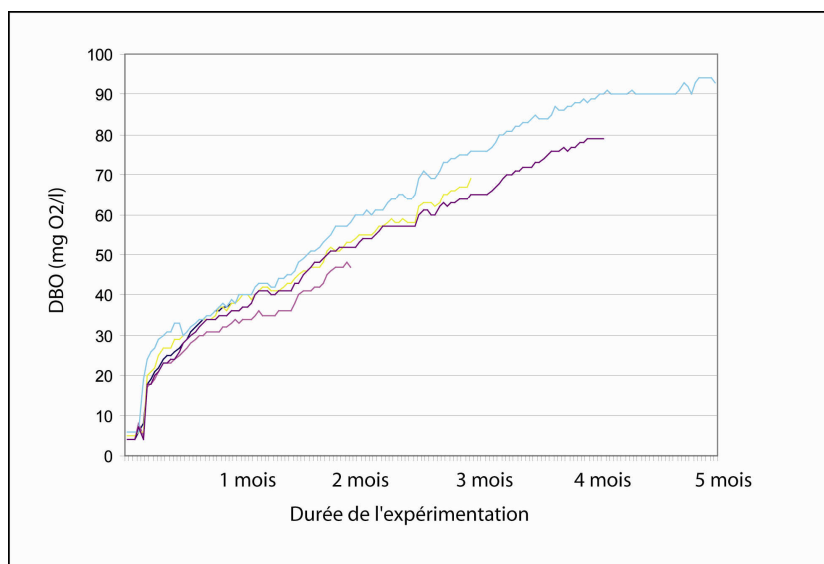


Figure IV-31: Mesure de la DBO durant la dégradation bactérienne de concentrés organiques de roche brute.

B-2-1-5) Dosage du carbone organique dissous (COD)

Les mesures de COD n'ont pas pu être effectuées pour les eaux issues des expérimentations de 1, 2 et 3 mois⁵⁹. Les concentrations en COD après 3 et 4 mois de dégradations sont faibles (3,502 et 2,463 mg/l).

B-2-1-6) Palynofacies quantitatif

En raison de l'altération possible de la phase minérale, l'interprétation des résultats obtenus par palynofacies quantitatif sur chaque produit de dégradation pose le même problème que celle des COT. Nous avons donc corrigé les résultats à partir des pertes de

⁵⁹ Les teneurs en COD mesurés à 1, 2 et 3 mois correspondent à des masses de Corg supérieures au Corg initialement introduit. Ceci traduit une possible pollution du matériel analysé.

poids mesurées entre les échantillons initiaux et les produits de dégradations. Cette correction permet, pour chaque type de particule, de calculer la masse récupérée en fin d'analyse, pour un gramme d'échantillon initial. Le calcul a été effectué de la façon suivante :

$$\text{eq 5) masse récupérée (mg)} = \frac{\% \text{ massique au sein du produit de dégradation} \times (1 \text{ g} - \text{perte estimée}) \times 1000}{\text{Concentré initial}}$$

Les résultats sont présentés dans le tableau IV-12 et dans la figure IV-32.

DBO	Concentré initial	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
mg LCO pour 1g d'échantillon initial	42.6	40.2	43.1	40.7	41.0	30.2
mg MOAr pour 1g d'échantillon initial	19.8	21.7	23.7	21.4	18.5	16.2
mg DG pour 1g d'échantillon initial	13.7	7.2	5.7	2.8	3.1	2.2
mg groupe pour 1g d'échantillon initial	0.0	0.0	0.0	2.3	11.0	14.4
mg pyrite pour 1g d'échantillon initial	30.7	7.6	2.6	3.9	3.7	0.0
mg MO mg pour 1g d'échantillon initial	76.1	69.1	72.5	67.2	73.6	63.0

Tableau IV-12: Masses de particules récupérées en fin de traitement DBO (mg) pour 1 gramme d'échantillon initial (concentré organique de roche Callovo-Oxfordienne).

La masse de LCO apparaît relativement stable durant les 4 premiers mois d'expérimentation : initialement égale à 42,6 mg, elle oscille par la suite entre 40,2 et 43,1 mg. Ce n'est qu'à partir du dernier mois que cette masse chute significativement vers la valeur de 30,2 mg.

La masse de MOAr semble augmenter durant les deux premiers mois, passant de 19,8 à 23,7 mg. Elle chute par la suite jusqu'à atteindre 16,2 mg au bout de 5 mois.

La masse de DG subit une chute rapide dès le premier mois d'expérimentation en passant de 13,7 à 7,2 mg. Celle-ci se poursuit par la suite, et la masse de Dg n'est plus que de 2,2 mg au bout de 5 mois.

La masse de pyrite évolue de façon similaire et chute de 30,7 à 7,6 mg dès le premier mois. Elle a totalement disparu en fin d'expérimentation.

Nous observons, par contre, l'apparition d'une MO amorphe particulière à partir de 3 mois d'expérimentation, et dont la masse atteint 14,4 mg au bout de 5 mois. Celle-ci est qualifiée de « groupe » car elle apparaît constituée à la fois de particules amorphes et de LCO. Ce point est particulièrement visible sur section polie en lumière réfléchie (figure IV-33).

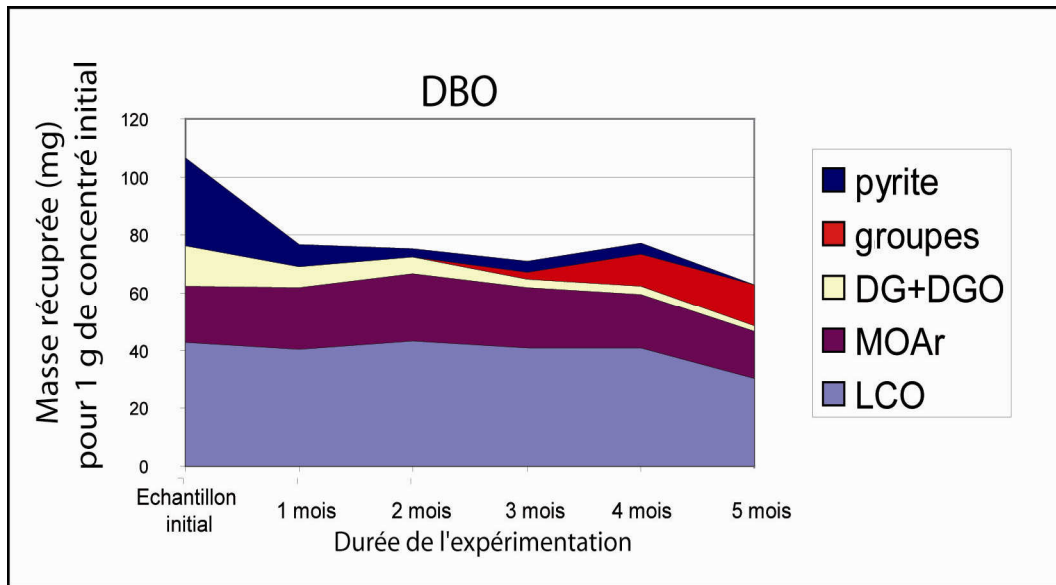


Figure IV-32: Masses de particules récupérées en fin de traitement DBO (mg) pour 1 gramme d'échantillon initial (concentré organique de roche Callovo-Oxfordienne).

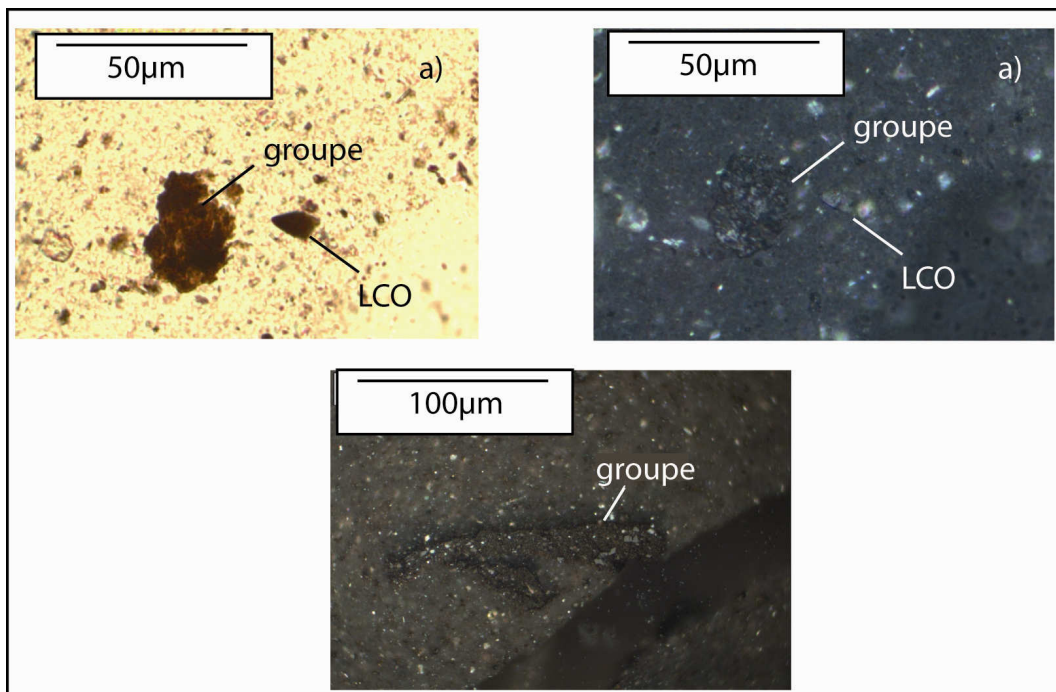


Figure IV-33: « groupe » de particules amorphes et de LCO apparaissant durant la dégradation bactérienne, a) en lumière transmise, b) en lumière réfléchie, c) en lumière réfléchie sur section polie.

B-2-1-7) Mesure des pouvoir réflecteurs

Les mesures ont été effectuées sur les produits de dégradation de 1, 3 et 5 mois.

Globalement, les valeurs des pouvoirs réflecteurs ($R_0\%$) sont variables (figure IV-34) et évoluent entre 1,1 % et 6,5 %. Les mesures les plus fréquentes se situent entre 1 et 2,5 %. Nous ne notons pas d'évolution significative au cours de la dégradation.

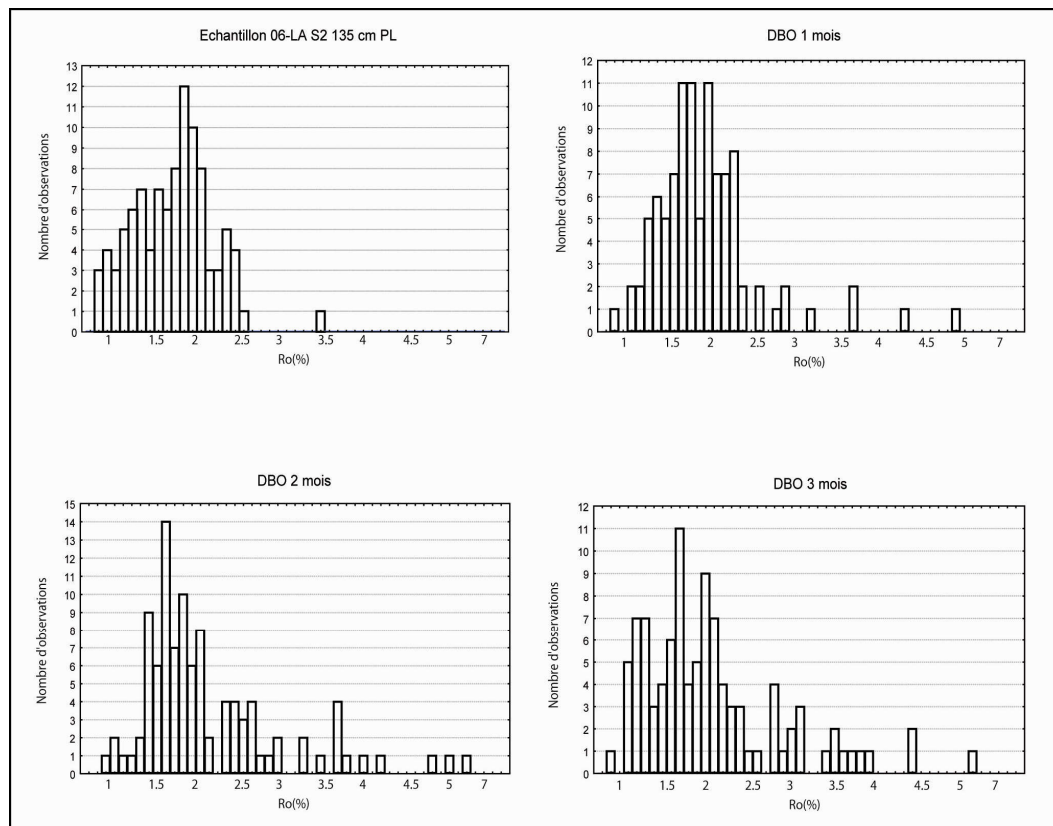


Figure IV-34: Diagrammes de fréquence des mesures du R_0 (%) des produits de la dégradation bactérienne de concentrés organiques de roche brute, et de l'échantillon initial (06-LA S2 135 cm)

B-2-2) Oxydation

B-2-2-1) Pesées des produits de dégradation

Les pertes massiques sont faibles et évoluent entre 3,23 et 10,57 % (tableau IV-13).

OXYDATION	Concentré initial	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
Poids initial (g)	1.96	2.41	2.17	2.27	2.20	2.18
Poids final (g)		2.24	2.10	2.03	2.04	2.00
Pertes en poids (%)		7.05	3.23	10.57	7.27	8.44
COT (%)	3.47	3.71	3.61	3.66	3.52	3.50
IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	15.00	19.00	24.00	31.00	33.00	33.00
IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	42.00	50.00	60.00	64.00	72.00	72.00
PC(%)	0.13	0.18	0.21	0.24	0.25	0.26
RC (%)	3.34	3.53	3.40	3.42	3.27	3.24
Pertes en TOC (%)		0.63	-0.68	5.68	5.94	7.65

Tableau IV-13: Pesées et paramètres Rock-Eval des produits de l'oxydation de concentrés organiques de roche brute.

B-2-2-2) Evolution des paramètres Rock-Eval

Les paramètres IH et IO semblent très légèrement augmenter durant l'oxydation expérimentale (respectivement de 15 à 33mg HC.g⁻¹COT et de 42 à 72 mg de CO₂.g⁻¹ COT).

Le paramètre PC augmente sensiblement au cours du temps (de 0,13 à 0,26) au détriment du paramètre RC. Le COT augmente lui aussi sensiblement dès le premier mois d'expérimentation (de 3,47 à 3,71 %).

Les pertes de Corg apparaissent négligeables durant les 2 premiers mois de dégradation. Elles augmentent par contre par la suite pour atteindre 7,65 % au bout de 5 mois.

B-2-2-3) Palynofacies quantitatif

Les résultats sont présentés dans le tableau IV-14 et dans la figure IV-35.

La masse de LCO paraît relativement constante durant l'oxydation expérimentale. Elle est, en effet, de 40,7 mg dans l'échantillon initial et évolue par la suite entre 36,9 et 46,8 mg.

La masse de MOAr reste elle aussi relativement constante, avec des valeurs oscillant entre 15,4 et 20,7 mg.

La masse de DG chute par contre très rapidement dès le premier mois d'expérimentation : elle passe de 12,9 à 6,4 mg. Cette chute se poursuit par la suite et la masse de DG n'est plus que de 2,1 et 2,6 mg au bout de 4 et 5 mois.

La masse de pyrite évolue de façon similaire et chute de 25,9 à 2,7 mg en 5 mois d'expérimentation.

OXYDATION	Concentré initial	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
mg LCO pour 1g d'échantillon initial	40.7	36.9	46.8	44.2	40.1	38.1
mg MOAr pour 1g d'échantillon initial	19.5	20.7	15.4	18.8	20.3	17.0
mg DG pour 1g d'échantillon initial	12.9	6.4	5.9	3.1	2.1	2.6
mg groupe pour 1g d'échantillon initial	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
mg pyrite pour 1g d'échantillon initial	25.9	17.7	12.3	9.8	17.4	2.7
mg MO mg pour 1g d'échantillon initial	73.1	64.0	68.1	66.1	62.5	57.6

Tableau IV-14 : Masses de particules récupérées en fin d'oxydation (mg) pour 1 gramme d'échantillon initial (concentré organique de roche Callovo-Oxfordienne).

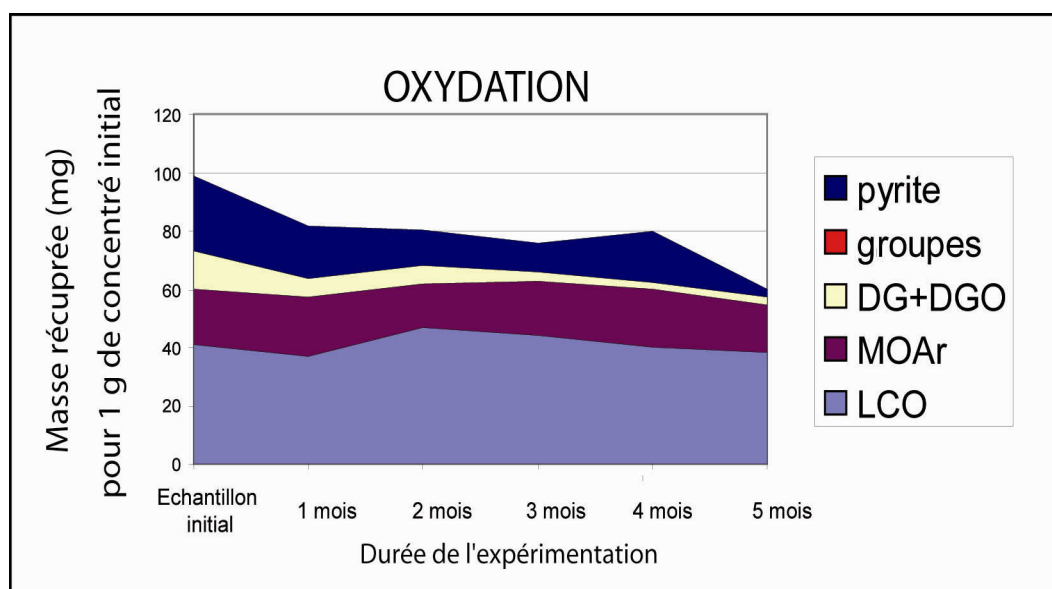


Figure IV-35 : Masses de particules récupérées en fin d'oxydation (mg) pour 1 gramme d'échantillon initial (concentré organique de roche Callovo-Oxfordienne).

B-2-2-4) Mesure des pouvoirs réflecteurs

Les mesures ont été effectuées sur les produits de dégradation de 1, 3 et 5 mois.

Globalement, les valeurs des pouvoirs réflecteurs (R0%) sont variables (figure IV-36) et évoluent entre 1,1 % et 6,5 %. Les mesures les plus fréquentes se situent entre 1 et 2,5 %. Nous ne notons pas d'évolution significative des R0% au cours de la dégradation.

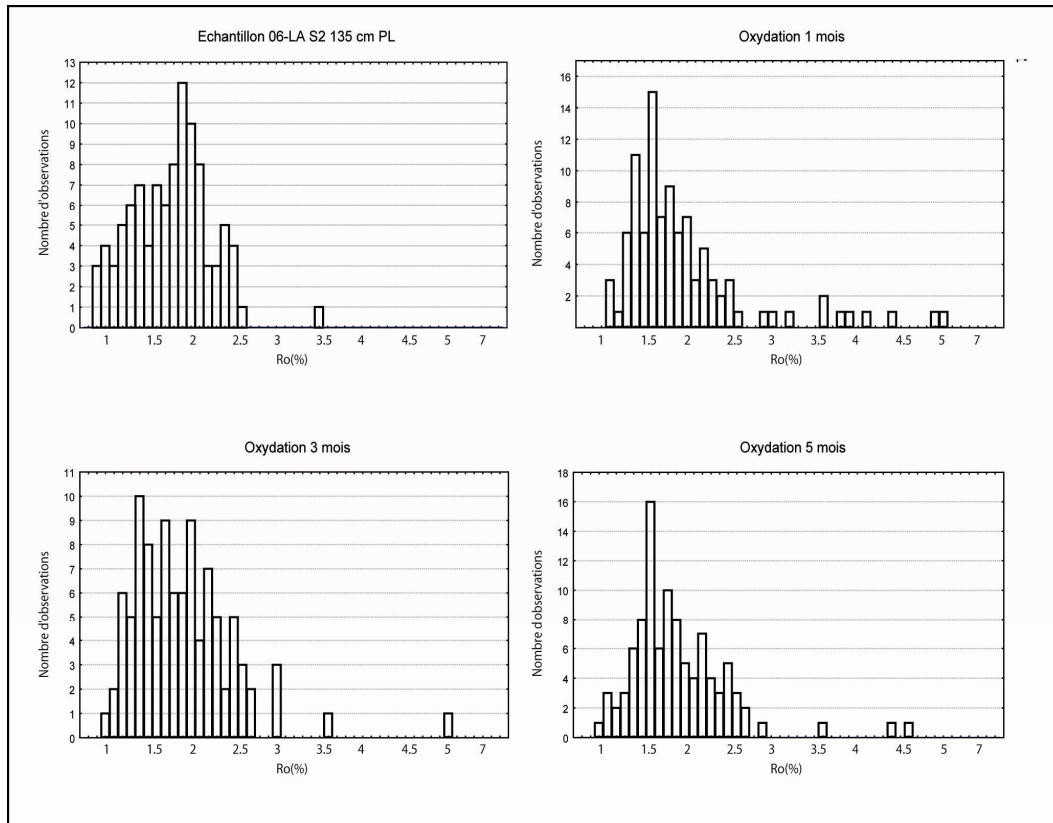


Figure IV-36 : Diagrammes de fréquence des mesures du R0 (%) des produits de l'oxydation de concentrés organiques de roche brute, et de l'échantillon initial (06-LA S2 135 cm PL).

B-2-3) Hydrolyse

B-2-3-1) Pesées des produits de dégradation

Les pertes en poids peuvent atteindre des valeurs conséquentes et évoluent entre 9,13 et 27,66 % (tableau IV-15).

HYDROLYSE	Concentré initial	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
Poids initial (g)	1.96	2.18	2.20	2.35	2.24	2.30
Poids final (g)		1.95	1.95	1.70	1.97	2.09
Pertes en poids (%)		10.55	11.36	27.66	12.05	9.13
COT (%)	2.45	2.58	2.51	2.33	1.92	1.87
IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	16.00	26.00	14.00	11.00	12.00	12.00
IO ((mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	33.00	36.00	33.00	32.00	28.00	34.00
PC (%)	0.09	0.12	0.10	0.08	0.06	0.08
RC (%)	2.36	2.46	2.41	2.25	1.86	1.79
Pertes en TOC (%)		5.80	9.19	31.20	31.08	30.64

Tableau IV-15: Pesées et paramètres Rock-Eval des produits de l'hydrolyse de concentrés organiques de roche brute.

B-2-3-2) Evolution des paramètres Rock-Eval

Les paramètres IH et IO sont stables durant les 5 mois d'hydrolyse : ils évoluent respectivement entre 16 à 26mg HC.g⁻¹COT et entre 28 à 36 mg de CO₂.g⁻¹ COT.

Les paramètres RC et PC apparaissent également stables. Par contre, le COT (%) chute sensiblement durant les 3 derniers mois d'expérimentation, passant de 2,51 à 1,87 %.

Nous observons des pertes croissantes de Corg durant les trois premiers mois d'expérimentation. Celles-ci se stabilisent ensuite autour de 31 %.

B-2-3-3) Palynofacies quantitatif

Les résultats sont présentés dans le tableau IV-16 et dans la figure IV-37.

Les masses de LCO et MOAr diminuent progressivement durant toute la durée de l'expérimentation. Elles passent respectivement, de 31,1 à 25 mg et de 17,9 à 11,7 mg pour un gramme d'échantillon initial. Notons cependant que les masses les plus faibles sont relevées à 3 mois (24 et 9,4mg).

Les masses de DG chutent de façon plus importante, passant de 9,2 à 3,1 mg.

La masse de pyrite évolue de façon similaire et chute de 17,1 à 6,6 mg en 5 mois d'expérimentation. La masse minimum (5,5 mg) est à nouveau relevée à 3 mois.

Hydrolyse	Concentré initial	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
mg LCO pour 1g d'échantillon initial	31.1	27.7	26.7	24.0	26.7	25.0
mg MOAr pour 1g d'échantillon initial	17.9	12.4	13.7	9.4	14.3	11.7
mg DG pour 1g d'échantillon initial	9.2	7.9	3.9	3.1	4.7	3.1
mg groupe pour 1g d'échantillon initial	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
mg pyrite pour 1g d'échantillon initial	17.1	4.9	7.5	5.5	6.4	6.6
mg MO pour 1g d'échantillon initial	58.2	48.0	44.3	36.4	45.8	39.9

Tableau IV-16 : Masses de particules récupérées en fin d'hydrolyse (mg) pour 1 gramme d'échantillon initial (concentré organique de roche Callovo-Oxfordienne).

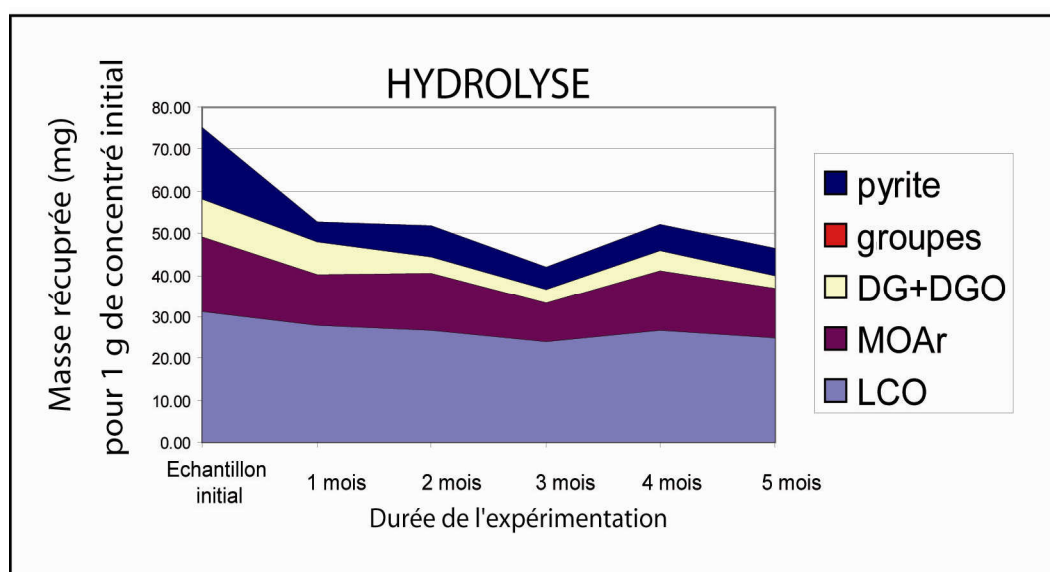


Figure IV-37: Masses de particules récupérées en fin d'hydrolyse (mg) pour 1 gramme d'échantillon initial (concentré organique de roche Callovo-Oxfordienne).

B-2-3-4) Dosage du carbone organique dissous (COD)

Les dosages n'ont pas pu être effectués pour les eaux issues de l'expérimentation à 1 mois⁶⁰. Les concentrations en COD des eaux après 2, 3, 4 et 5 mois sont de 32,3 , 45,12 , 48,06 et 36,14 mg /l.

⁶⁰ Les teneurs en COD mesurés à 1 mois correspondent à des masses de Corg supérieures au Corg initialement introduit. Ceci traduit une possible pollution du matériel analysé.

B-2-3-5) Mesure des pouvoir réflecteurs

Ces mesures ont été effectuées sur les produits de dégradation de 1, 3 et 5 mois.

Globalement, les valeurs des pouvoirs réflecteurs ($R_0\%$) sont variables (figure IV-38) et évoluent entre 1,1% et 6,5%. Les mesures les plus fréquentes se situent entre 1 et 2,5 %. Nous ne notons pas d'évolution significative de ce paramètre au cours de la dégradation.

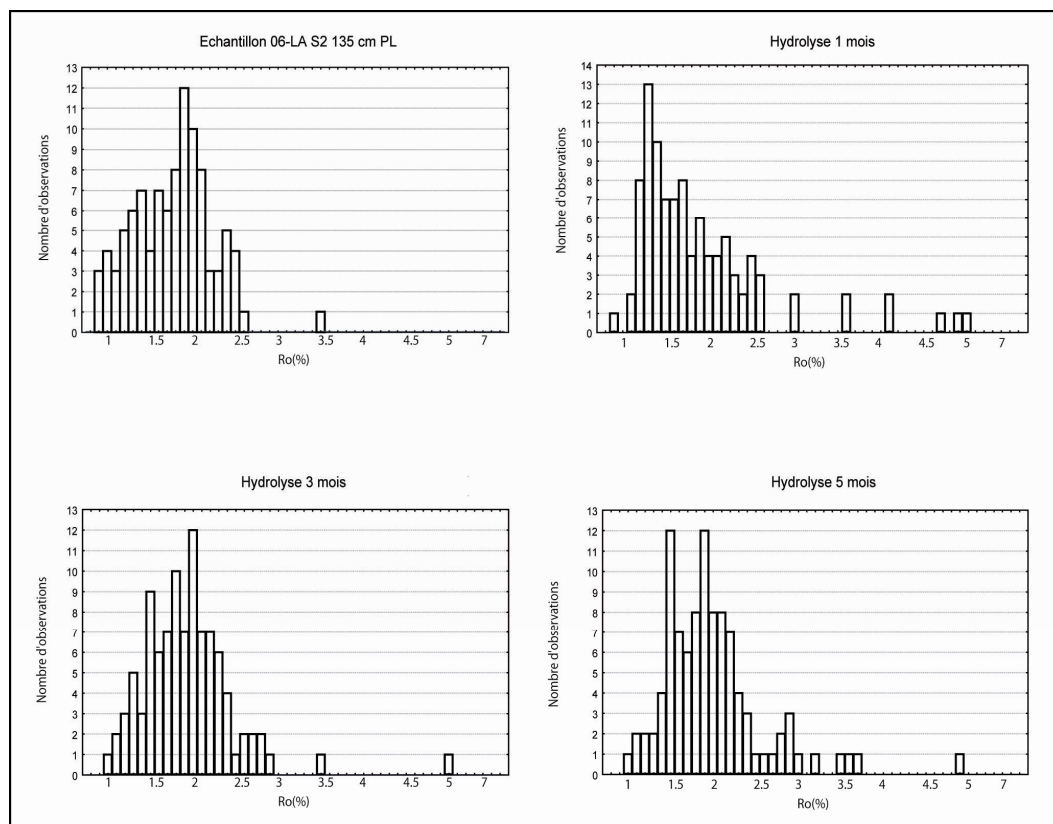


Figure IV-38 : Diagrammes de fréquence des mesures du R_0 (%) des produits l'hydrolyse de concentrés organiques de roche brute, et de l'échantillon initial (06-LA S2 135 cm PL).

B-3) Résultats des dégradations expérimentales de la MOR

B-3-1) Dégradation bactérienne

B-3-1-1) Pesées des produits de dégradation

Les pertes en poids atteignent 15 % dès le premier mois. Elles oscillent ensuite entre 20,82 et 32,33 % (tableau IV-17).

DBO	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
Poids initial (g)	1.91	1.95	1.97	2.07	2.01
Poids final (g)	1.62	1.32	1.59	1.51	1.59
Pertes en poids (%)	15.05	32.33	19.29	27.05	20.82

Tableau IV-17 : Pesées des produits de la dégradation bactérienne de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.

B-3-1-2) Mesure de la DBO

Les valeurs de DBO augmentent de façon significative durant les 5 mois d'expérimentation. Plus précisément, 99, 155, 233, 270 et 289 mg d'O₂/l⁻¹ ont été consommés à 1, 2, 3, 4 et 5 mois (figure IV-39).

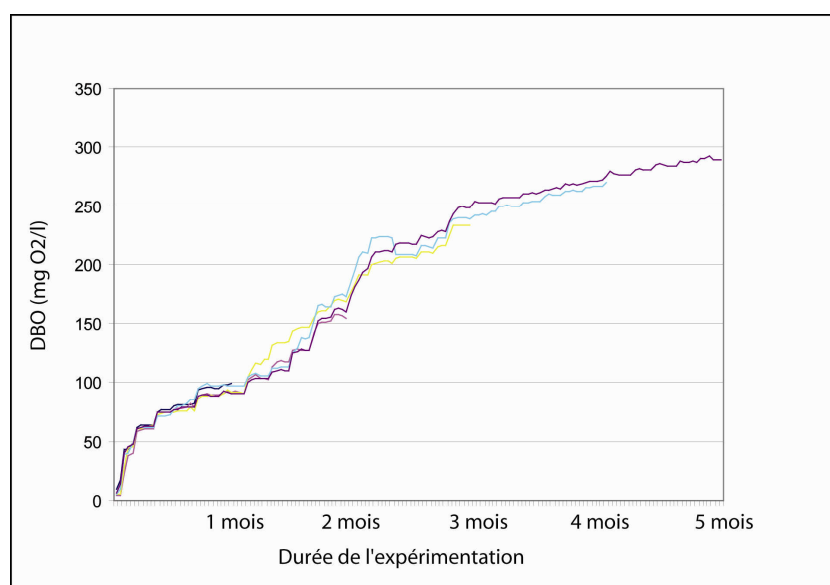


Figure IV-39: Mesure de la DBO durant la dégradation bactérienne de concentrés organiques de roche brute.

B-3-1-3) Dosage du carbone organique dissous (COD)

Les concentrations en COD des eaux issues de cette expérimentation sont de 650,4 , 314,71 , 256,74 , 192,39 et 172,34 mg/l au bout de 1, 2, 3, 4 et 5 mois d'expérience (figure IV-40) .

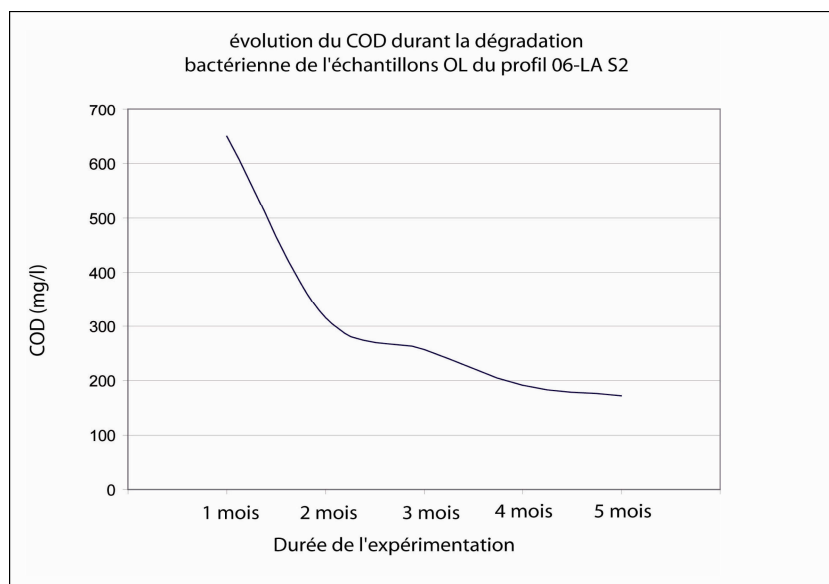


Figure IV-40 : dosage du COD dans les eaux issues de la dégradation bactérienne de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.

B-3-1-4) Palynofacies

Le palynofacies quantitatif étant difficilement applicable à la MOR (cf. §-IV-A), nous avons du limiter nos investigations au palynofacies classique. Cependant, afin de prendre en compte les pertes massiques de MO au cours de l'expérimentation :

- 1) Nous avons corrigé les % surfaciques comptés pour chaque type de particule grâce aux densités.
- 2) Nous avons calculé pour chaque type de particule la masse récupérée en fin d'analyse, rapporté à un gramme d'échantillon OL initial. Ce calcul a été effectué, particule par particule, de la façon suivante :

$$\text{eq 6) masse récupérée (mg) = \% surfacique corrigé (densité) au sein du produit de dégradation} \times (1 \text{ g} - \text{perte estimée})$$

Les pertes massiques de chaque famille de particules sont présentés dans le tableau IV-18 et la figure IV-41 :

Les amorphes : La masse de MOAgc (initialement de 0,205g) évolue durant l'expérience sans tendance notable (entre 0,017 et 0,215g). Par contre, les AG semblent augmenter de façon progressive, de 0,131g à 0,417g.

Les débris ligno-cellulosiques : La masse des LCDs semble quelque peu augmenter durant les premiers mois d'expérimentation. Initialement de 0,068g, elle atteint la valeur de 0,149g au troisième mois. Elle diminue par la suite pour se limiter à la valeur de 0,080g au bout du cinquième mois.

La masse de LCDs paraît diminuer durant les 5 mois d'analyse, mais de façon non constante. Globalement, des 0,190g initiaux, ne restent que 0,084g au bout de 5 mois. La masse des LCT diminue, par contre, de façon progressive et passe de 0,242g à 0,067g.

Les éléments figurés : Les masses de particules mbr chutent durant les 5 mois d'analyse, passant de 0,165g à 0,044g. Les SO-PO sont quasiment absents au sein des échantillons analysés. Les Myc ne sont pas observés dans l'échantillon initial et leur contribution reste faible par la suite⁶¹.

Les DGR : l'examen des lames nous a amené à rajouter une nouvelle classe particule : les DGR. Ces derniers possèdent une morphologie particulière (figure IV-42), très proche de celle des DG, et ils ne sont que peu, ou pas présents dans les échantillons de MOR naturels. Ils apparaissent dès le premier mois d'analyse, mais ne dépassent jamais 0,019g.

⁶¹ Compte tenu des très faibles teneurs en myc observées dans l'ensemble des produits d'altération, il n'est pas étonnant que nous n'en ayons pas observé dans l'échantillon initial.

DBO	Echantillon initial	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
MOAgc (g)	0.205	0.161	0.017	0.215	0.058	0.085
LCDs (g)	0.068	0.064	0.111	0.149	0.120	0.080
LCDG (g)	0.190	0.119	0.150	0.031	0.130	0.084
LCT (g)	0.242	0.197	0.181	0.102	0.075	0.067
AG (g)	0.131	0.186	0.146	0.150	0.273	0.417
SO-PO (g)	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	0.000
Myc (g)	0.000	0.005	0.005	0.009	0.008	0.003
mbr (g)	0.165	0.099	0.057	0.127	0.047	0.044
DGR (g)	0.000	0.019	0.011	0.015	0.016	0.011

Tableau IV-18 : Masses de particules récupérées en fin de traitement DBO (g) pour 1 gramme d'échantillon initial (échantillon OL du profil 06-LA S2).

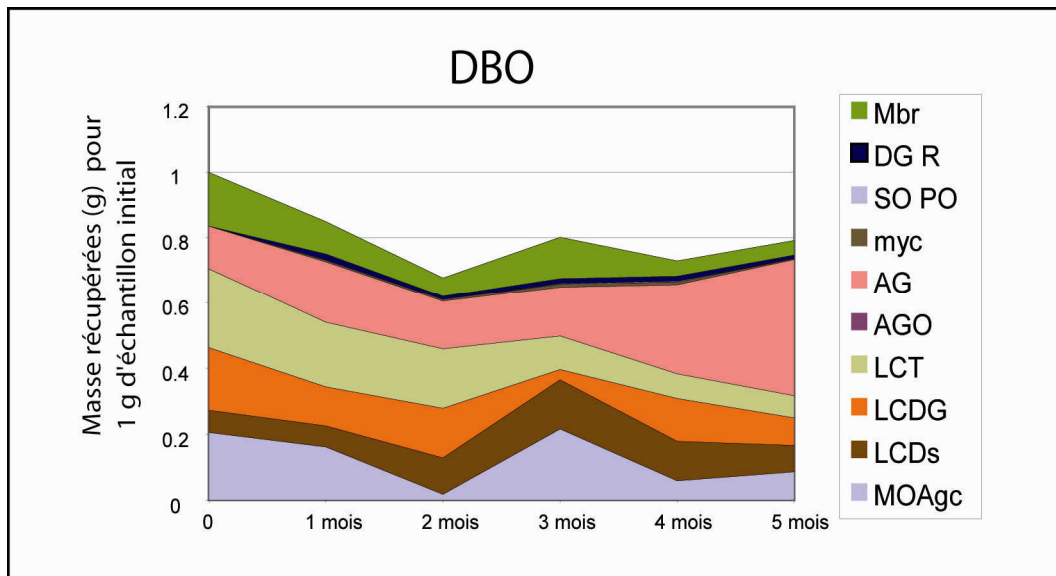


Figure IV-41 : Masses de particules récupérées en fin de traitement DBO (g) pour 1 gramme d'échantillon initial (échantillon OL du profil 06-LA S2).

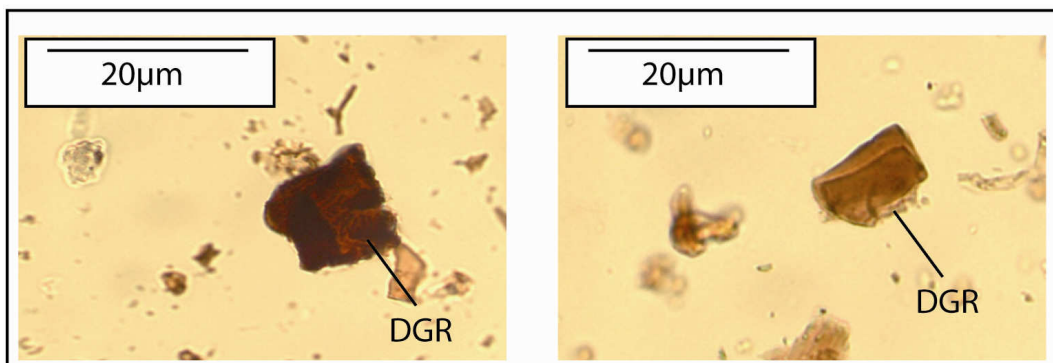


Figure IV-42 : Particules de DGR observées au sein des produits de l'altération de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.

B-3-1-5) Mesure des pouvoirs réflecteurs

Certaines particules observées⁶² au sein des produits de dégradation de l'échantillon de litière présentent une légère réflectance. Ces particules sont majoritairement constituées de LCDs et DGR, et dans une moindre mesure, de LCDG et d'AG (figure IV-43). Leur proportion dans le produit de dégradation reste faible.

La réflectance de ces particules est très homogène et les R0(%) mesurés n'excèdent pas 0,39 % (16 points de mesures après 5 mois de dégradation).

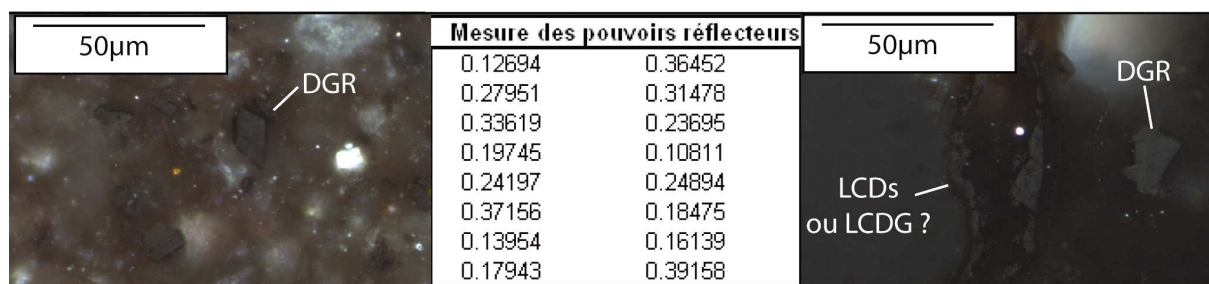


Figure IV-43: Photos de particules légèrement réfléchissantes (sections polies, lumière réfléchie) et mesures des R0 (%) au sein du produit d'altération (5 mois) de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.

⁶² Ces particules sont de tailles diverses, de µm quelques à plusieurs centaines de µm.

B-3-2) Oxydation

B-3-2-1) Pesées des produits de dégradation

Pour cause de perte de matériel⁶³, nous n'avons pas pu estimer le poids du résidu de dégradation à 2 mois d'analyse. Cependant, et hormis cet incident, nous remarquons que les pertes augmentent de façon progressive durant l'oxydation (de 6,83 à 21,61 %) (Tableau IV-19)⁶⁴.

OXYDATION	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
Poids initial (g)	2.05	–	1.71	2.13	1.99
Poids final (g)	1.91	–	1.41	1.71	1.56
Pertes en poids (%)	6.83	–	17.69	19.72	21.61

Tableau IV-19 : Pesées (grammes) des produits de l'oxydation de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.

B-3-2-2) Palynofacies

Les pertes massiques de chaque famille de particules sont présentées dans le tableau IV-20 et la figure IV-44 :

Les amorphes : La masse de MOAgc chute, voire disparaît, de façon brutale dès le premier mois d'analyse (de 0,205 à 0,007g). Inversement, celle des particules d'AG augmente brusquement (de 0,131 à 0,548 g), puis chute pour atteindre 0,392 g au bout de 5 mois d'expérience. Notons la présence de particules semblables aux AG mais beaucoup plus denses et de couleur sombre (figure IV-45). Ces particules, que nous avons nommées AGO, apparaissent dès le premier mois d'expérimentation (0,059g) puis diminuent, voire disparaissent, par la suite.

Les débris ligno-cellulosiques : Les LCDs apparaissent relativement constants durant les 4 premiers mois. Leur masse oscille en effet entre 0,034 et 0,068g. Elle augmente quelque peu durant le cinquième mois pour atteindre 0,100g.

⁶³ Indépendante de notre volonté.

⁶⁴ Pour les calculs suivants, nous avons attribué une perte massique à l'échantillon de 2 mois, une valeur égale à la moyenne de celles mesurées à 1 et 3 mois (soit 10 %).

Les LCDG se retrouvent en quantités variables dans les produits de dégradation (de 0,091 à 0,190g). Aucune réelle logique ne semble pouvoir être dégagée. Nous observons par contre une diminution progressive des LCT, dont la masse passe de 0,242g à 0,071g.

Les éléments figurés : Les particules de mbr sont mieux représentées et chutent durant les 5 mois d'analyse, de 0,165g à 0,029g. Les SO-PO et Myc sont quasiment absents au sein des échantillons analysés.

Les DGR : Ces particules sont faiblement présentes dans les produits de dégradation et ne dépassent jamais 0,003g.

Oxydation	Echantillon initial	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
MOAgc	0.205	0.007	0.002	0.006	0.002	0.008
LCDs	0.068	0.047	0.034	0.054	0.047	0.100
LCDG	0.190	0.091	0.178	0.164	0.120	0.163
LCT	0.242	0.129	0.125	0.057	0.092	0.071
AGO	0.000	0.059	0.025	0.010	0.004	0.009
AG	0.131	0.548	0.492	0.483	0.473	0.392
SO-PO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Myc	0.000	0.019	0.005	0.018	0.012	0.011
mbr	0.165	0.032	0.036	0.029	0.053	0.029
DGR	0.000	0.000	0.003	0.002	0.000	0.002

Tableau IV-20 : Masses de particules récupérées en fin d'oxydation (g) pour 1 gramme d'échantillon initial (échantillon OL du profil 06-LA S2).

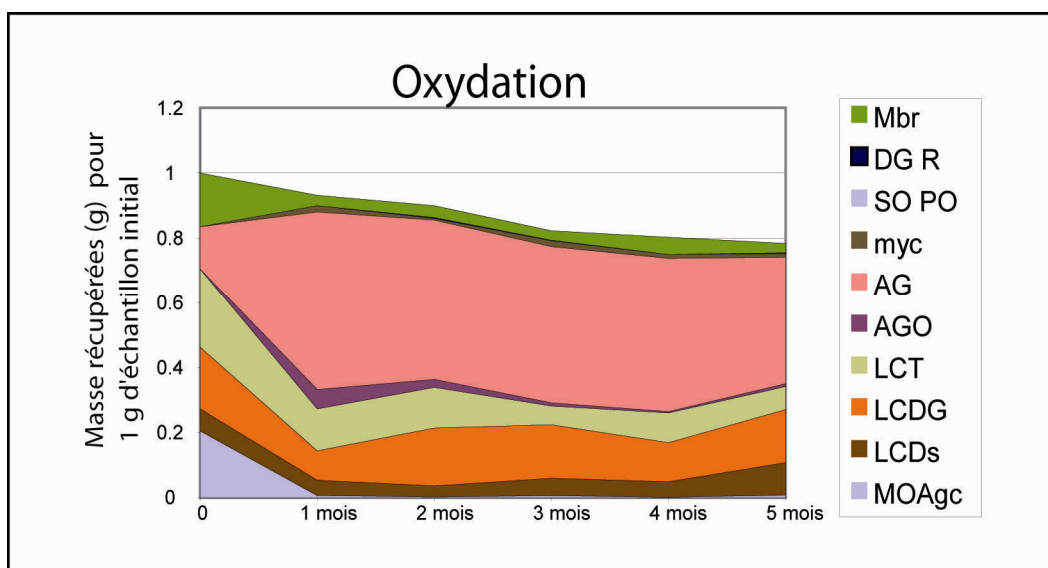


Figure IV-44 : Masses de particules récupérées en fin d'oxydation (g) pour 1 gramme d'échantillon initial (échantillon OL du profil 06-LA S2).

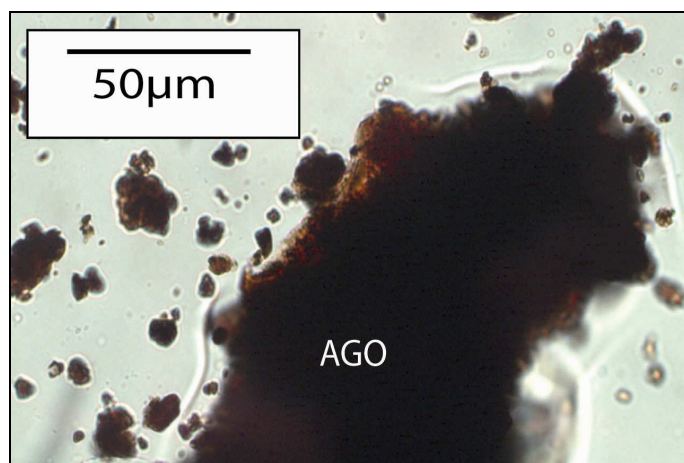


Figure IV-45 : Particule d'AGO observée au sein des produits de dégradation de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.

B-3-2-3) Mesure des pouvoirs réflecteurs

Certaines particules observées au sein des produits de dégradation de l'échantillon de litière présentent une légère réflectance (figure IV-46). Ces particules sont majoritairement constituées de LCDs et aux DGR, et dans une moindre mesure, de LCDG et AG et d'AGO.

La réflectance de ces particules est très homogène et les $R0(\%)$ mesurés n'excèdent pas 0,46 % (19 points de mesures après 5 mois de dégradation).

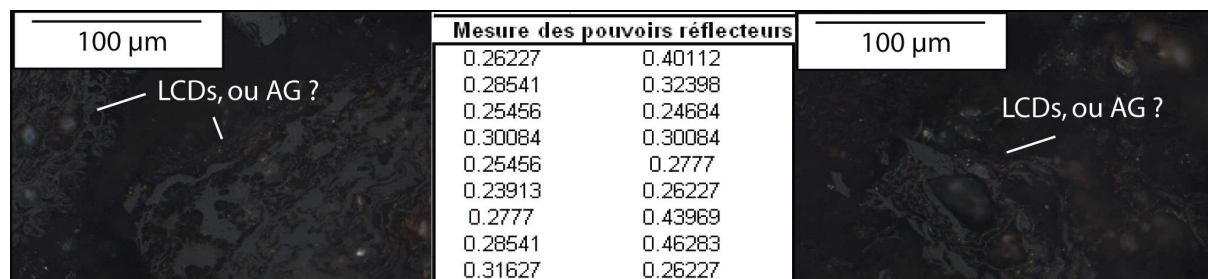


Figure IV-46: Photos de particules légèrement réfléchissantes (sections polies, lumière réfléchie) et mesures des $R0(\%)$ au sein du produit d'altération (5 mois) de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.

B-3-2) Hydrolyse

B-3-3-1) Pesées des produits de dégradation

La perte massique constatée atteint un maximum de 35,28 % dès le premier mois. Les valeurs obtenues par la suite oscillent entre 22,28 et 27,5 % (tableau IV-21).

HYDROLYSE	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
Poids initial (g)	2.06	2.02	2.34	1.78	2.05
Poids final (g)	1.33	1.57	1.70	1.32	1.52
Pertes en poids (%)	35.28	22.28	27.35	25.84	25.85

Tableau IV-21 : Pesées (grammes) des produits de l'hydrolyse de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.

B-3-3-2) Palynofacies

Les pertes massiques de chaque famille de particules sont présentées dans le tableau IV-22 et la figure IV-47 :

Les amorphes : La masse de MOAgc chute de façon brutale dès le premier mois d'analyse (de 0,205 à 0,002g). Inversement, celle des particules d'AG augmente brusquement lors de ce premier mois (de 0,131 à 0,206g) avant de chuter à 0,085 à 5 mois. Les masses de particules de AGO augmentent par contre constamment pour atteindre la valeur de 0,444g.

Les débris ligno-cellulosiques : Nous notons en premier lieu la relative stabilité de la masse de LCDs, oscillant entre 0,030 et 0,085g. La masse des LCDG chute, globalement, de 0,190g à 0,074g en 5 mois d'expérimentation. Nous observons, par contre et en même temps, une diminution progressive de la masse de LCT, passant de 0,242g à 0,034g.

Les éléments figurés : La masse des particules de mbr chutent significativement dès le premier mois, de 0,165g à 0,012g. Les SO-PO et Myc sont quasiment absents au sein des échantillons analysés.

Les DGR : Ces particules sont faiblement présentes dans les produits de dégradation et ne dépassent jamais 0,018g.

Hydrolyse	Echantillon initial	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
MOAgc	0.205	0.002	0.003	0.003	0.004	0.001
LCDs	0.068	0.075	0.085	0.079	0.030	0.064
LCDG	0.190	0.095	0.197	0.104	0.047	0.074
LCT	0.242	0.073	0.043	0.056	0.043	0.034
AGO	0.000	0.164	0.250	0.369	0.409	0.444
AG	0.131	0.206	0.165	0.085	0.171	0.085
SO-PO	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
Myc	0.000	0.004	0.006	0.007	0.012	0.010
mbr	0.165	0.012	0.009	0.014	0.024	0.021
DGR	0.000	0.017	0.018	0.008	0.003	0.006

Tableau IV-22 : Masses de particules récupérées en fin d'hydrolyse (g) pour 1 gramme d'échantillon initial (échantillon OL du profil 06-LA S2).

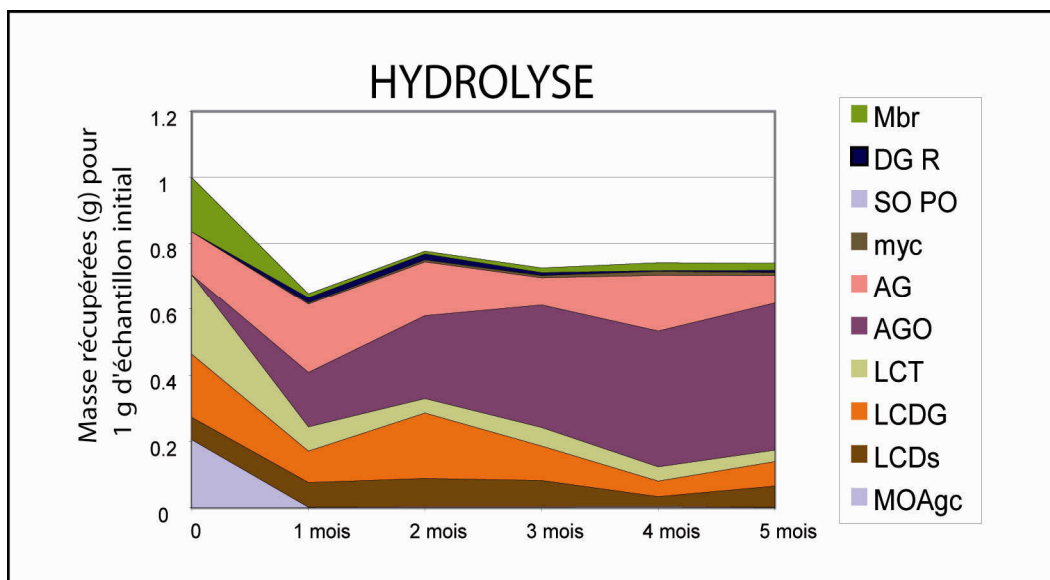


Figure IV-47 : Masses de particules récupérées en fin d'hydrolyse (g) pour 1 gramme d'échantillon initial (échantillon OL du profil 06-LA S2).

B-3-3-3) Mesure des pouvoirs réflecteurs

Certaines particules observées au sein des produits de dégradation de l'échantillon de litière présentent une légère réflectance (figure IV-48), leurs proportions sont conséquentes. Ces particules, de tailles diverses (de quelques μm à plusieurs centaines de μm), sont majoritairement formées de LCDs, DGR et dans une moindre proportion de LCDG, d'AG et d'AGO.

La réflectance de ces particules est très homogène et les $R0(\%)$ mesurés n'excèdent pas 0,46 % (16 points de mesures après 5 mois de dégradation).

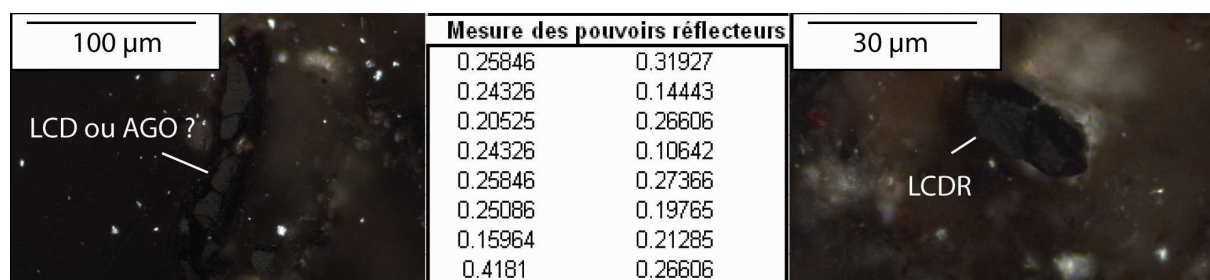


Figure IV-48 : Photos de particules légèrement réfléchissantes (sections polies, lumière réfléchie) et mesures des $R0(\%)$ au sein du produit d'altération (5 mois) de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.

B-4) Bilan des dégradations expérimentales

B-4-1) Cas de la MOF

B-4-1-1) Dégradation bactérienne

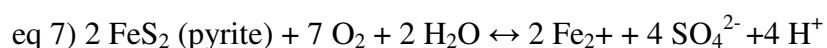
Pertes globales de MOF :

Deux argumentaires montrent que les pertes totales de MOF face à la dégradation bactérienne apparaissent limitées.

-1) Le premier argumentaire est direct. La perte en Corg mise en évidence par la pyrolyse Rock-Eval n'est effective qu'au bout de 5 mois et ne concerne, alors, que 10 % seulement du contenu initial⁶⁵.

-2) Le second argumentaire est indirect et se fonde sur l'examen de la pyrite, qui représente 3 % environ de la masse du concentré initial (Palynofacies quantitatif), soit 60 mg environ. Nous observons sa disparition brutale et complète au cours des 5 mois d'expérimentation (figure IV-32).

Cette disparition, se passant à pH légèrement acide (estimé entre 6 et 7 par papier pH), est régie par l'équation suivante :



Elle se traduit par une consommation d'O₂ de 93 mg d'O₂/l⁻¹ (mesure DBO) qui apparaît, si l'on raisonne en masse, suffisante pour altérer 43 mg de pyrite. Ces 43 mg du même ordre de grandeur que la masse initiale de pyrite dans l'échantillon étudié (60mg). Ainsi, l'ensemble de l'O₂ consommé pourrait traduire l'altération de la pyrite, sans faire intervenir de minéralisation de MO.

⁶⁵ Le palynofacies quantitatif a permis d'estimer des pertes de MOF évoluant entre 3,2 et 11,7% de la MOF durant les 4 premiers mois (tableau IV et figure IV-e). Cette perte atteint 17,2% au bout du cinquième mois. Ces pertes plus importantes que celle mesurées pour le Corg sont à prendre avec précaution, notamment à partir du quatrième mois, lorsque les particules « groupe » atteignent une masse conséquente. Nous atteignons là la limite de la méthode, car ces particules sont de grandes tailles (de l'ordre de 100 µm), et le pollen standard n'est pas d'un volume suffisant pour les prendre correctement en compte.

Pertes par type de particules de MOF :

Les diverses particules observées réagissent de façon différente à l'altération bactérienne. Deux types s'opposent :

- le premier est constitué des LCO et MOAr relativement stables durant les quatre premiers mois de dégradation (tableau IV-23 et figure IV-49 a et b), ne subissant des pertes que durant le cinquième mois (29,2 et 18 %) ;
- le second est constitué des DG et des particules de pyrite, qui sont caractérisés par des pertes significatives dès les premiers mois (tableau IV-23 et figure IV-49c et d), atteignant respectivement 84 et 100 % en fin d'expérimentation.

DBO	Concentré initial	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
pertes LCO(%)	0.0	5.6	-1.2	4.5	3.8	29.2
pertes MOAr (%)	0.0	-9.6	-20.2	-8.2	6.2	18.0
pertes DG (%)	0.0	47.5	58.5	79.4	77.4	84.1
pertes pyrite (%)	0.0	75.1	91.5	87.3	88.0	100.0
pertes totale MO (%)	0.0	9.2	4.7	11.7	3.2	17.2

Tableau IV-23 : Pertes estimées par palynofacies quantitatif durant l'altération bactérienne de concentrés organiques de roche brute.

Bilan et devenir des pertes de MOF : dissolution ou minéralisation

Le problème du devenir des pertes (dissolution et/ou minéralisation ?) peut être abordé grâce au dosage du DOC.

Les teneurs en DOC mesurées au bout de 4 et 5 mois d'expérience sont faibles (3,502 et 2,463 mg/l). Ces valeurs correspondent à 1,51 et 1,06 mg de Corg, c'est-à-dire moins de 2 % du Corg introduit (76 mg environ⁶⁶).

Ne pouvant nous fier aux pertes estimées à 4 mois d'expérience (où la masse du produit d'altération est plus importante que celle du produit initial, ce qui révèle un problème), nous nous contenterons de noter que ce COD, largement inférieur aux pertes estimées à 5 mois (10 % de Corg et 17,2 % de la MOF selon le type d'estimation), ne peut pas les expliquer. Sur cette base, il semblerait que plus de 80 % des pertes observées se traduisent par une minéralisation plutôt qu'une dissolution.

⁶⁶ Ces valeurs sont obtenues en utilisant le COT du concentré initial, et les poids des échantillons soumis aux tests DBO de 4 et 5 mois.

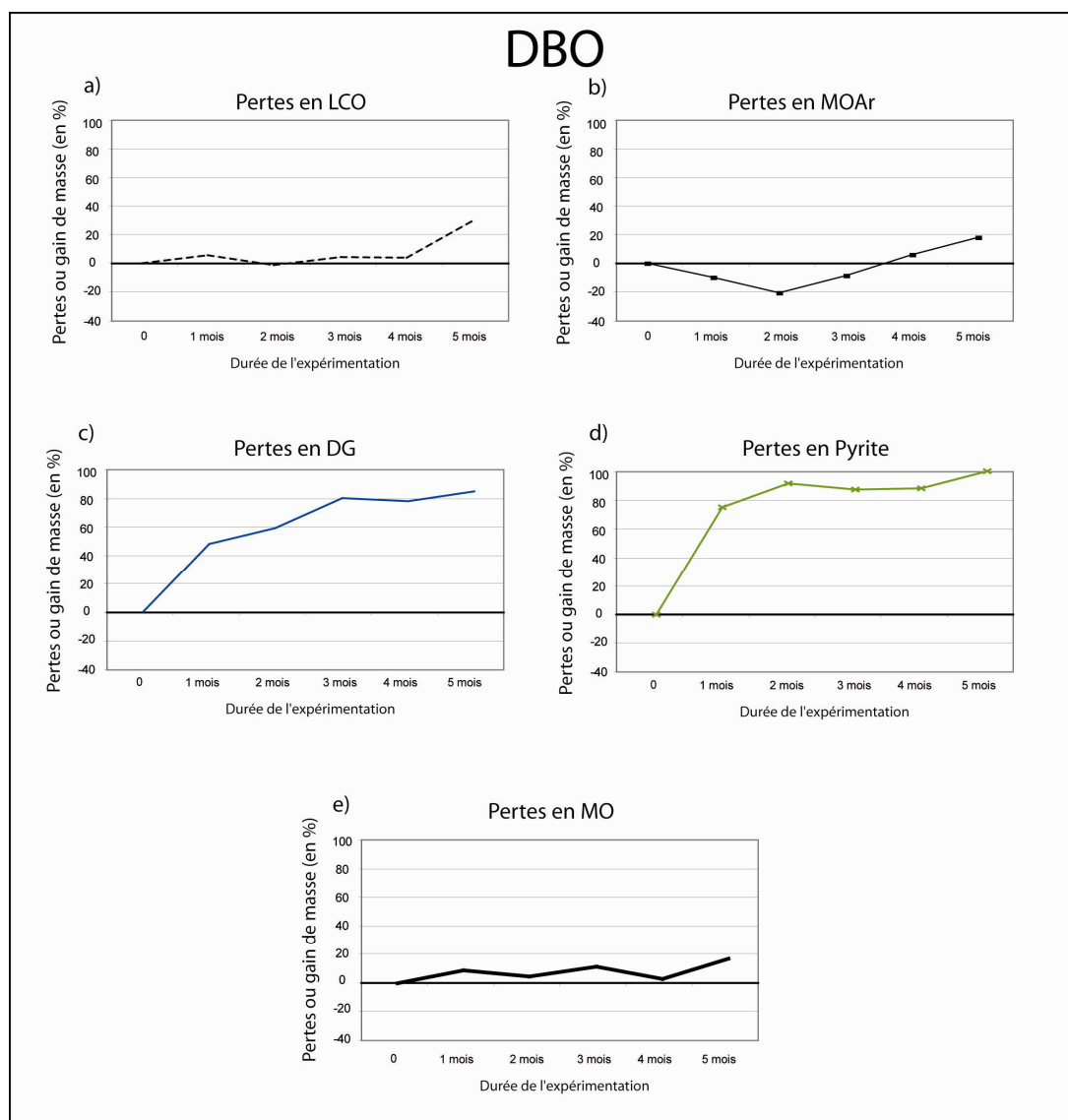


Figure IV-49 : Pertes estimées par palynofacies quantitatif durant l'altération bactérienne de concentrés organiques de roche brute.

B-4-1-2) Oxydation***Pertes globales de MOF :***

Les pertes massiques maximales en Corg et en MOF atteignent respectivement 7,65 et 21,2 % au bout de 5 mois d'altération :

- les pertes en COF calculées à partir de la pyrolyse Rock Eval ne semblent pas significatives durant les 2 premiers mois d'expérimentation. Elles ne le deviennent que par la suite, pour atteindre la valeur de 7,65 % au bout de 5 mois ;
- les pertes en MOF calculées à partir du palynofacies quantitatif semblent plus importantes. Elles sont variables sur les 4 premiers mois (de 6,8 à 14,4 % de le MOF) puis augmentent et atteignent 21,2 % au cinquième mois d'expérimentation.

De ces deux estimations relativement contradictoires, il apparaît que celle obtenue grâce à la pyrolyse Rock-Eval semble la plus crédible. En effet, celle obtenue par palynofacies quantitatif, est sujette à plus d'aléas techniques et possède une marge d'erreur plus élevée⁶⁷. Nous notons d'ailleurs que les pertes de 21,2 % au bout de 5 mois sont très supérieures à celles mesurées les mois précédents (de l'ordre de 10 %).

Pertes par type de particules de MOF:

Ici encore, deux types de particules se distinguent par leurs comportements :

- le premier est constitué de LCO et de MOAr relativement résistants à l'oxydation (tableau IV-24 et figure IV-50 a et b). Nous observons parfois même une surconcentration en LCO (14,8 et 8,6 % au bout de 2 et 3 mois), et en MOAr (jusqu'à 6,5 % à 1 mois) ;
- le second, composé des DG et des particules de pyrite, apparaît plus labile. Des pertes importantes sont en effet observées dès le premier mois d'expérimentation (tableau IV-22 et figure IV-50 c et d) pour atteindre respectivement 80 et 89,5 % au bout de 5 mois.

OXYDATION	Concentré initial	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
pertes LCO(%)	0.0	9.5	-14.8	-8.6	1.7	6.6
pertes MOAr (%)	0.0	-6.5	20.8	3.3	-4.4	12.8
pertes DG (%)	0.0	50.3	54.0	76.3	83.3	80.0
pertes pyrite (%)	0.0	31.6	52.5	62.0	32.8	89.5
pertes totale MO (%)	0.0	12.4	6.8	9.6	14.4	21.2

Tableau IV-24 : Pertes estimées par palynofacies quantitatif durant l'oxydation de concentrés organiques de roche brute.

⁶⁷ La marge d'erreur du palynofacies seul (hors protocoles expérimentaux de dégradation) est déjà de 20% (cf. § A-IV-5-1-2).

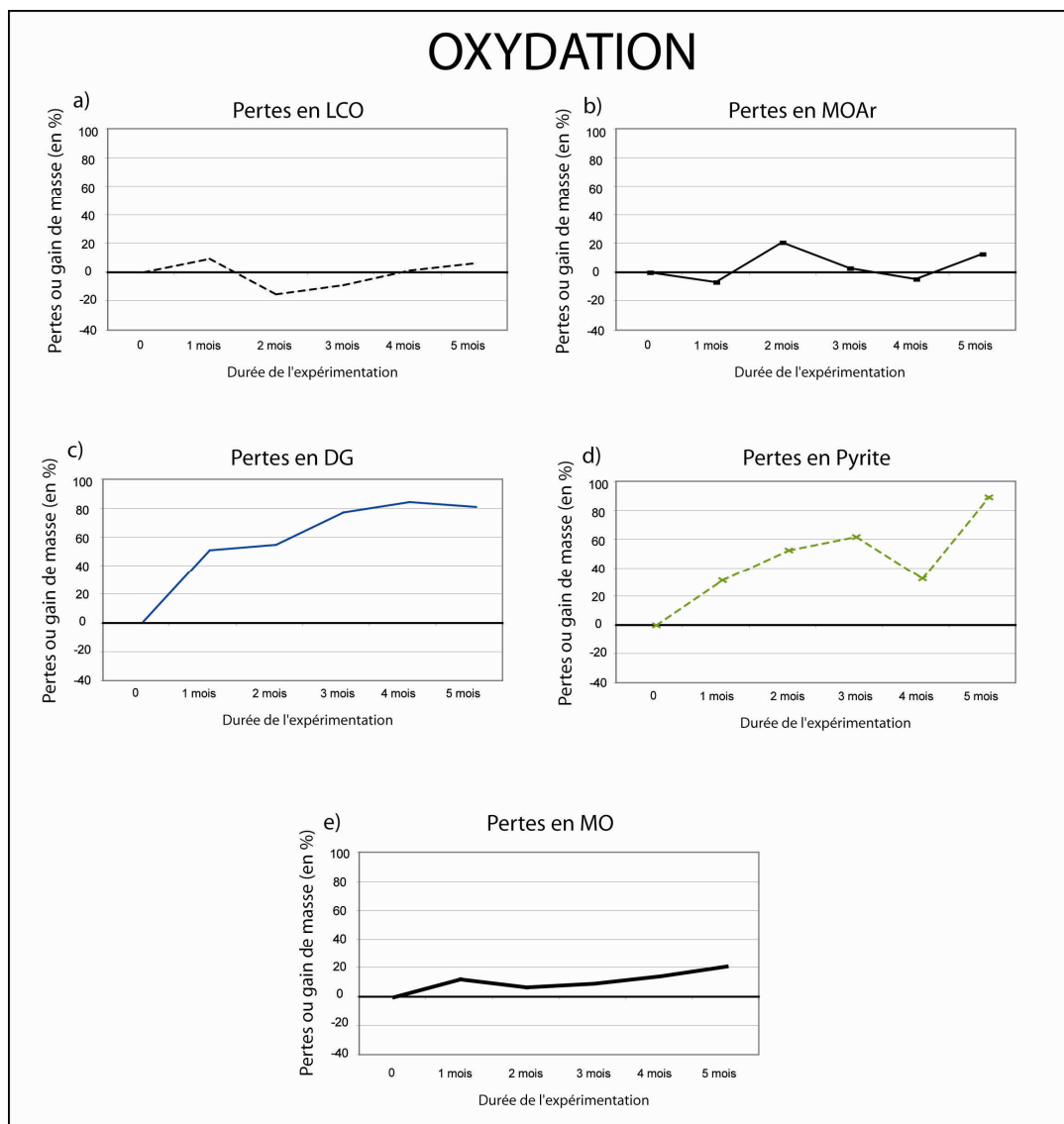


Figure IV-50: Pertes estimées par palynofacies quantitatif durant l'oxydation de concentrés organiques de roche brute.

Bilan et devenir des pertes de MOF : dissolution ou minéralisation

L'oxydation expérimentale de la MOF génère des pertes très moyennes. Celles-ci affectent particulièrement les DG, et à moindre échelle les MOAr puis les LCO. Nous observons cependant une évolution qualitative de cette MOF, avec une hausse sensible des paramètres IH, IO et PC. Ceci atteste d'une oxydation et d'une hydrogénation du matériel organique. Parallèlement les réflectances des particules ne semblent pas évoluer significativement durant cette altération. Notons que la pyrite apparait beaucoup plus sensible que la MO : les pertes atteignent 89,5 % au cinquième mois.

En l'absence de phase liquide, nous considérons que ces pertes traduisent essentiellement une minéralisation⁶⁸.

B-4-1-3) Hydrolyse

Pertes globales de MOF :

L'hydrolyse semble être l'altération qui affecte quantitativement le plus la MOF. Les pertes maximum estimées atteignent en effet 30 % du Corg (pyrolyse Rock-Eval) et 31,5 % de la MOF (palynofacies quantitatif) en fin d'expérimentation (tableau IV-25).

Hydrolyse	Concentré initial	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
pertes LCO(%)	0.0	10.8	14.2	23.0	14.0	19.6
pertes MOAr (%)	0.0	31.0	23.5	47.7	20.3	34.5
pertes DG (%)	0.0	14.3	57.7	66.3	48.5	65.8
pertes pyrite (%)	0.0	71.5	56.3	68.1	62.4	61.7
pertes totale MO (%)	0.0	17.6	23.9	37.4	21.4	31.5

Tableau IV-25: Pertes estimées par palynofacies quantitatif durant l'hydrolyse de concentrés organiques de roche brute.

Pertes par type de particules de MOF :

Trois types de particules se distinguent par leurs comportements lors de l'hydrolyse :

- Les LCO apparaissant comme les particules les plus stables (tableau IV-23 et figure IV-51 a). Elles subissent néanmoins des pertes progressives, atteignant à 19,6 % en fin d'expérimentation
- Les MOAr subissant une perte significative dès le premier mois d'expérimentation (31 %). Celle-ci oscille par la suite entre 20,3 et 47,7 % durant le reste de l'expérimentation (tableau IV-23 et figure IV-51 b).
- les DG et pyrites subissant une perte de masse importante (>60 %) dès le premier mois d'expérimentation (tableau IV -25 et figure IV-51 c et d).

⁶⁸ Un détail mérite d'être souligné : les pertes en DG à 2 et 3 mois d'expérimentation (de l'ordre de 7 mg par g d'échantillon initial) semblent en partie contrebalancées par la surconcentration en LCO (surconcentration de 6,1 et 3,5 mg par g d'échantillon initial). Il est donc possible qu'une part des pertes observées pour les particules DG soit due à une oxydation et opacification plutôt qu'à une minéralisation.

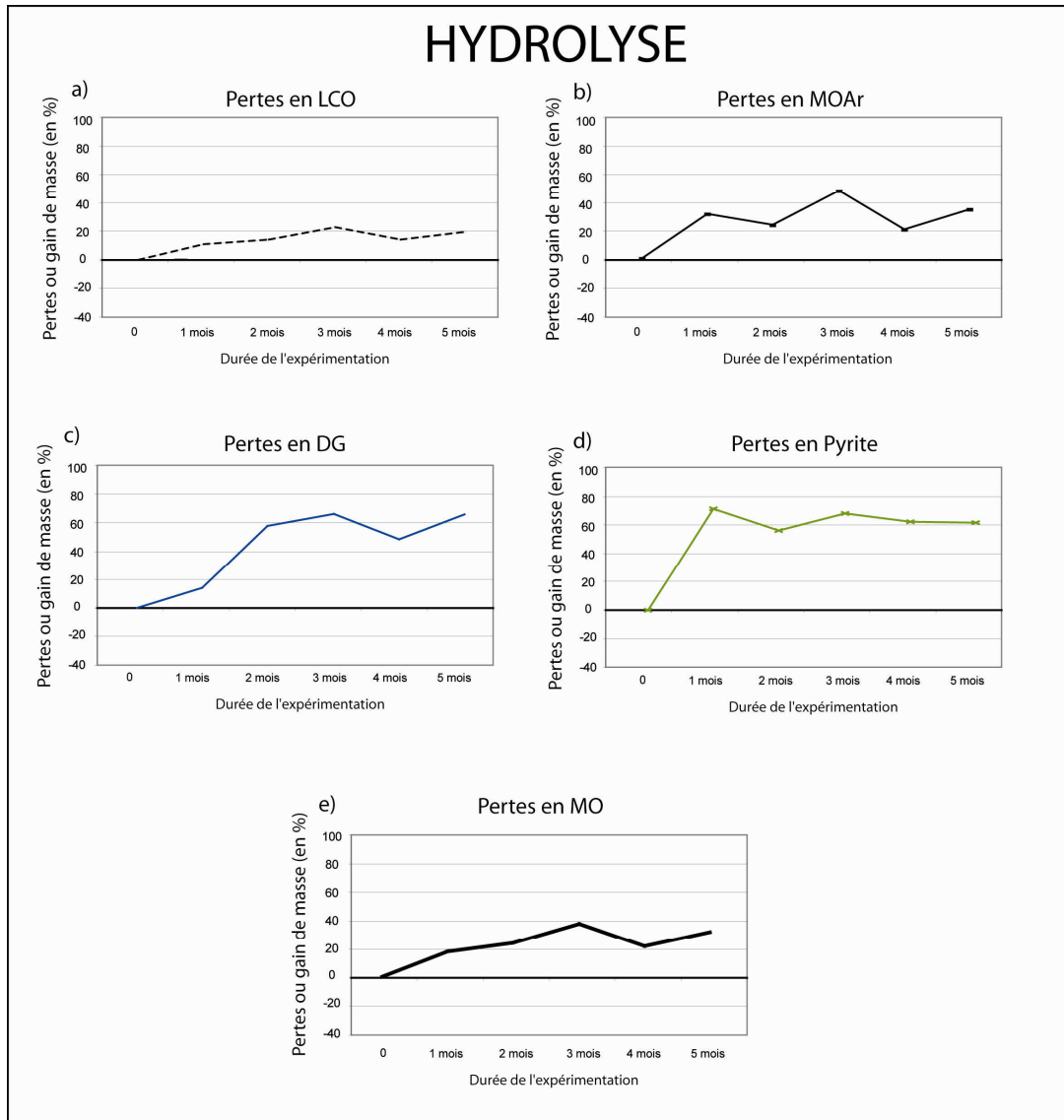


Figure IV-51: Pertes estimées par palynofacies quantitatif durant l'hydrolyse de concentrés organiques de roche brute.

Bilan et devenir des pertes de MOF : dissolution ou minéralisation

Le problème du devenir des pertes (dissolution et/ou minéralisation) a été abordé à grâce au dosage du DOC (figure IV-52) :

Les teneurs en DOC mesurées à 2, 3, 4 et 5 mois d'expérience évoluent entre 32,20 et 48,06 mg/l : soit 13,9 et 20,8 mg de Corg. Parallèlement, les pertes estimées en Corg pour ces mêmes mois atteignent des valeurs comparables (5 à 17,3 mg de Corg).

Ceci suggère que la quantité de COD mesurée suffit à expliquer la totalité des pertes observées en Corg. Nous considérons donc que la totalité des pertes massiques mesurée durant l'hydrolyse expérimentale traduit une dissolution effective de la MOF.

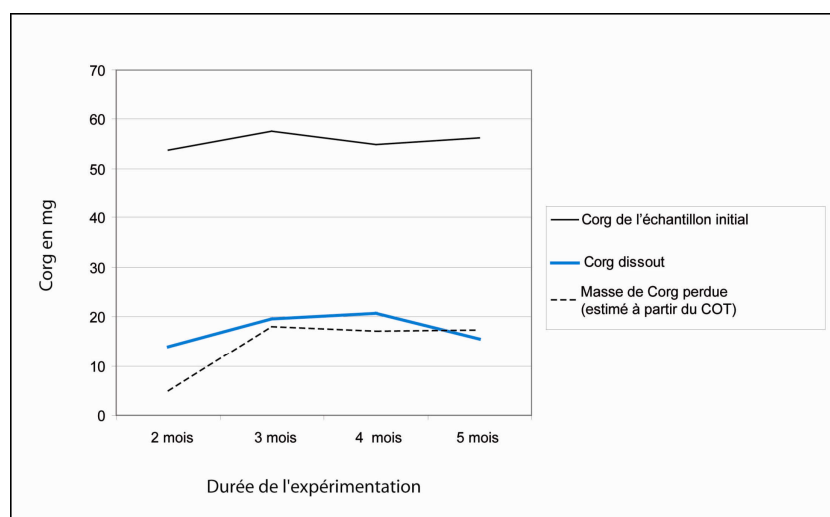


Figure IV-52 : Masses de carbone initial (courbe noire), dissoutes (courbe bleue) et perdues (courbe noire pointillée), durant l'hydrolyse du concentré organique de roche brute.

B-4-2) Cas de la MOR

B-4-2-1) Dégradation bactérienne

Pertes globales

Les estimations de pertes de masses atteignent près 30 % dès le second mois d'expérimentation.

Evolution des particules de MOR :

Trois types de particules s'opposent :

- Les premières voient leurs masses fortement diminuer au cours de la dégradation bactérienne. Sont concernées les particules de LCDG, MOAgc, LCT et mbr dont les pertes atteignent respectivement 56, 58,5 et 72,2 et 73 % en fin d'expérimentation.
- Les secondes voient leurs masses augmenter sensiblement lors de l'altération. Ces particules peuvent, de fait, être interprétées comme des produits de dégradation. Ceci est particulièrement visible pour les AG dont les masses gagnent jusqu'à 219 % au bout de 5 mois. Une même tendance est observée pour les LCDs, dont les masses augmentent sensiblement durant les 3 premiers mois (jusqu'à 121 %).
- Les troisièmes apparaissent en cours d'expérimentation. Elles peuvent aussi être interprétées comme des produits de dégradation. Sont concernées les particules de DGR, atteignant 0,019g maximum à 1 mois d'expérimentation.

En conclusion, les MOAgc, LCT et LCDG et mbr semblent être des produits labiles, alors que les AG, LCDs et DGR paraissent être des produits de dégradation.

Bilan et devenir des pertes de MOR : dissolution ou minéralisation ?

Les 30 % moyens de perte massique peuvent être issue d'une minéralisation, ou d'une dissolution. Il est difficile de répondre à cette question car :

- 1) l'importante concentration en COD mesurée après un mois d'expérimentation (650,4 mg/l) correspond environ à 281 mg de Corg⁶⁹ : soit 38 % du Corg introduit en début d'expérience (800 mg environ). Elle chute ensuite très rapidement pour atteindre la valeur de 172,4 mg/l, ce qui correspond à 74,5 mg de Corg. Le système étant clos, cette chute traduit soit une minéralisation, soit une re-précipitation du COD.

⁶⁹ Cette masse est obtenue en combinant la masse d'échantillon 06-LA S2 OL introduite (environ 2 g) et le COT de ce dernier (40,67%).

-2) parallèlement les mesures de DBO augmentent progressivement pour atteindre 289 mg d'O₂/l⁻¹ au bout de 5 mois. Cette valeur correspond à la minéralisation de 117 mg de MO⁷⁰ soit 49 mg de Corg.

Il semble donc que la totalité des pertes massiques, observées dès le premier mois d'expérimentation, soient le résultat d'une dissolution. Au bout de 5 mois d'expérimentation, 27 % du COD ainsi formé semble rester en solution, 24 % semble avoir été minéralisé, et 49 % a probablement re-précipité.

B-4-2-2) Oxydation

Pertes globales

Les pertes massiques augmentent progressivement durant les 5 mois d'altération pour atteindre 21,6 %. En l'absence de phase liquide, nous ne considérons que cette masse à été minéralisée.

Evolution des particules :

Trois types de particules s'opposent :

- Le premier, constitué de LCT, de mbr et de MOAgc, apparait sensible à l'altération. Les pertes atteignent respectivement de 71, 80,5 et 96,7 % en fin d'expérimentation.
- Le second regroupe les LCDG et LCDs, apparait plus résistants à l'oxydation. Les pertes moyennes se limitent à 25,7 et 16,7 %.
- Le troisième est principalement représenté par les AG. Ces particules voient leur masse augmenter significativement dès le premier mois d'expérimentation (319 %). Nous pouvons leur associer les DGR et AGO qui apparaissent en cours d'oxydation, mais leurs faibles concentrations sont difficilement interprétables.

⁷⁰ Ce calcul est effectué sur la base de $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \leftrightarrow 6CO_2 + 6H_2O$.

B-4-2-3) Hydrolyse

Pertes globales

Les pertes de masse augmentent très rapidement et se stabilisent vers 25 %.

Evolution des particules :

Trois types de particules s'opposent :

- Le premier est constitué des LCDg, LCT, mbr et MOAgc, qui représentent les particules organiques les plus sensibles à cette altération : les pertes dépassent en effet 50, 69, 92 et 99 % dès le premier mois d'expérimentation.
- Le second est constitué des LCDs qui alternent entre perte et surconcentration.
- Le troisième regroupe des particules dont les masses augmentent au fil des mois, et peuvent de fait, être considérées comme des produits de dégradation. Nous observons ainsi une hausse très importante des AG (près de 58 % dès le premier mois), mais le fait le plus marquant est l'apparition d'une masse conséquente d'AGO. Celle-ci pouvant représenter jusqu'à 60 % de la masse du produit final d'altération (5mois). Parallèlement, nous observons l'apparition de DGR, mais leurs masses restent faibles.

Bilan et devenir des pertes de MOR : dissolution ou minéralisation

N'ayant pas pu doser les COD dans les eaux issues de cette altération, nous ne pouvons pas expliquer les pertes observées par une minéralisation, ou par une dissolution.

B-4-2-4) Dégradation des différents composants des litières

Les diverses expériences que nous venons présenter sur la MOR suggèrent que certaines particules observées (AG, AGO et DGR) peuvent être interprétées comme des produits de dégradation. Ceci étant, nous ne pouvons, à ce stade, aller plus avant car ces particules sont présentes dès l'échantillon initial. Celui-ci est, en effet, représentatif d'une litière, où coexistent naturellement MO fraîches (feuilles, débris de bois, ...), et des produits de leur altération (figure IV-53).



Figure IV-53: Litière observée à proximité des profils 06-LA A et 06LA S2 (bassin du Laval). Ce cliché témoigne de l'hétérogénéité des composants (feuilles, débris de bois, aiguilles de pins ...) et de leur état de dégradation (cliché Y. Graz).

Nous avons donc testé cette hypothèse en prélevant dans l'échantillon OL initial différents composants initiaux (aiguilles de pins, feuilles de chênes, herbacées et petit bois), et en les soumettant séparément au test DBO durant 2 mois. Les résultats sont présentées en figure IV-54.

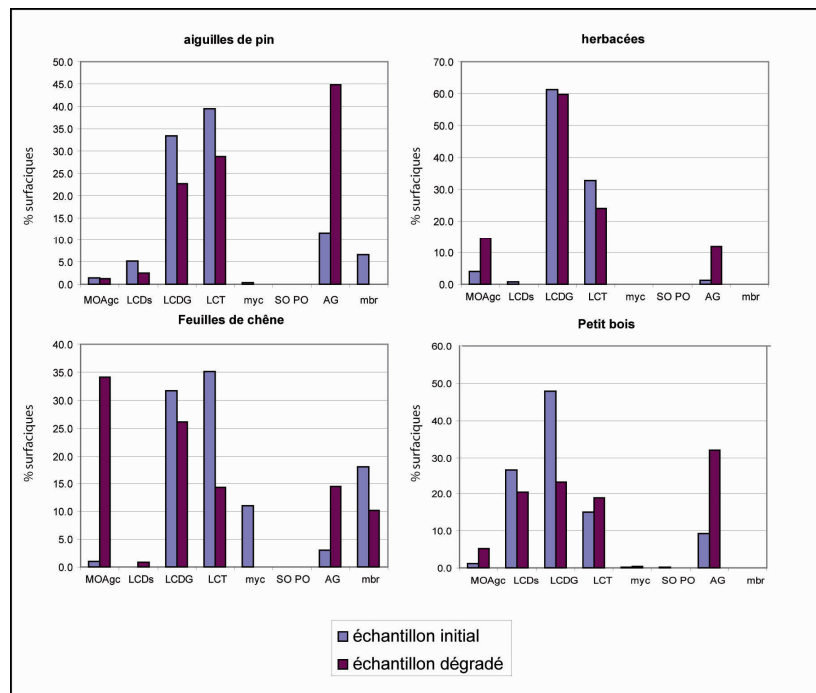


Figure IV-54 : Palynofacies, avant et après dégradation des échantillons constitués d'aiguilles de pins, de feuilles de chênes, d'herbacées et de petit bois.

Ces composants initiaux sont essentiellement constitués de LCDG et de LCT, auxquels s'ajoutent des mbr et des LCDs (notamment dans les cas de feuilles de chêne et de petit bois).

Leurs % surfaciques diminuent presque systématiquement après dégradation. Nous remarquons, cependant, deux phénomènes remarquables : -1) une augmentation des MOAgc, principalement observée dans le cas de feuilles de chêne (figure IV-56) ; mais surtout -2) une augmentation systématique des AG, quelque soit l'organisme producteur.

Ceci confirme l'hypothèse considérant les AG comme le résultat de la dégradation précoce des matériaux frais. L'apparence de ces particules peut, par contre, quelque peu différer selon le matériel d'origine (figure IV-56).

- Les AG issues de la dégradation de petit bois sont de grandes tailles (plusieurs centaines de μm), de structure grumeleuse et de couleur marron/orangée.

- Les AG issues de la dégradation d'aiguilles de pin sont aussi de grandes tailles (plusieurs centaines de μm). Leurs structures sont généralement allongées et leur couleur varie entre l'orange et le rouge vif.

- Les AG issues de la dégradation de feuilles de chêne sont des amas grumeleux atteignant parfois plusieurs centaines de μm . Leur couleur évolue entre le beige et l'orange.

- Les AG issues de la dégradation d'herbacées sont de tailles et de morphologies variables. Leur couleur varie entre l'orange et le rouge vif. Nous observons, notamment, de nombreuses particules plus ou moins rectangulaires, de tailles moyennes (quelques dizaines de μm), pouvant être interprétées comme étant les contenus gélifiés de cellules végétales.

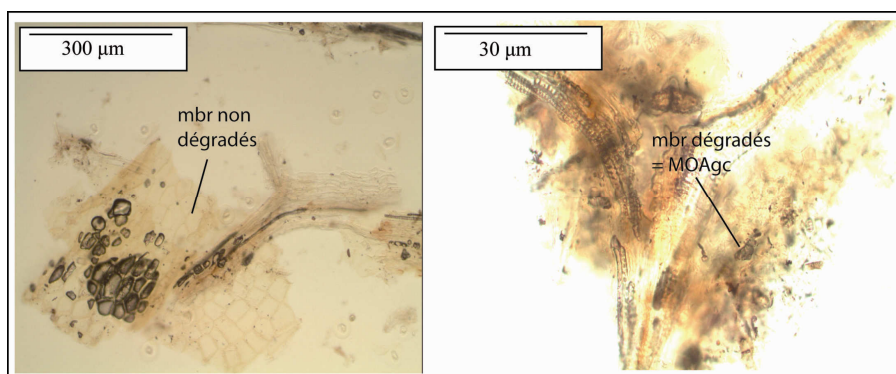


Figure IV-55 : Evolution et amorphisation des membranes de feuille.

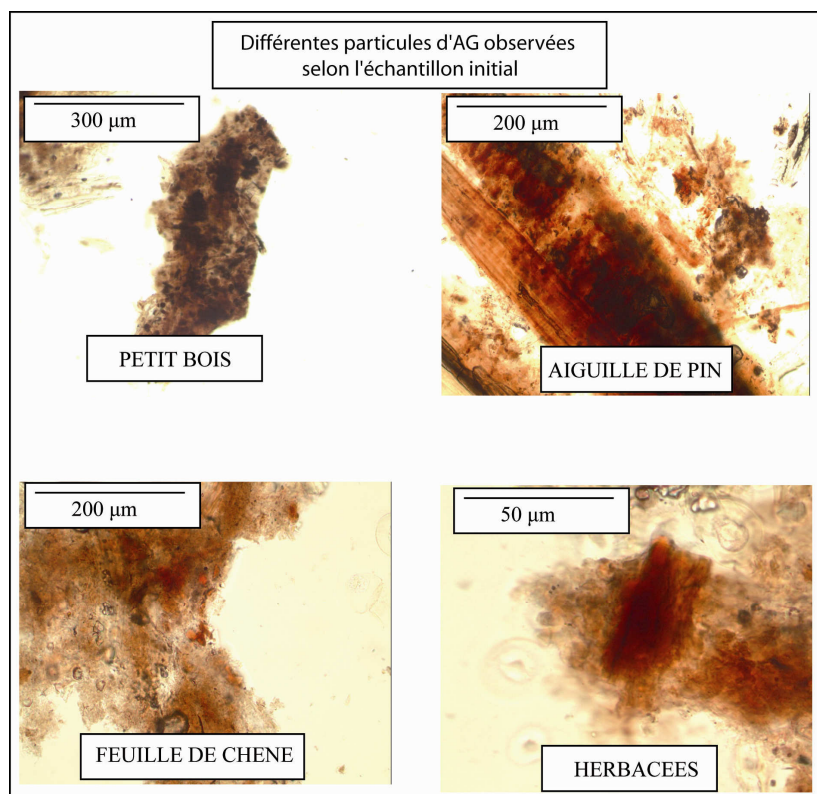


Figure IV-56 : Différentes particules d'AG observées selon le matériel d'origine.

B-5) Conclusion

B-5-1) Dégradation de la MOR

Les résultats fournis par les dégradations expérimentales de la MOR sont résumés dans le tableau IV- 26.

Les pertes globales atteignent de 20 à 30 % de la masse initiale. Elles se traduisent par un mécanisme de dissolution/minéralisation dans le cas de la dégradation bactérienne, et par une minéralisation simple dans le cas de l'oxydation.

Les différents types de particules observées semblent réagir différemment face à ces altérations. Nous pouvons les classer en trois groupes :

-1) Les particules labiles : Ces particules perdent rapidement une part importante de leurs masses, quelque soit le type d'altération (parfois >80 %). Il s'agit des LCT, MOAgc, mbr, et dans une moindre proportion, des LCDG.

-2) Les particules résistantes à l'altération : Ce groupe n'est représenté que par les LCDs, qui, en règle générale, alternent entre perte et surconcentration. Ces particules semblent majoritairement issues de bois et de tissus porteurs, ce qui peut expliquer leur résistance⁷¹.

-3) Les produits de dégradation : Ce groupe est formé des particules dont la masse augmente durant les expérimentations. Il s'agit des AG, AGO et DGR.

Les résultats montrent que parmi les produits de dégradation de la MOR, seuls les DGR peuvent de premier abord être confondus avec des constituants de la MOF. Ces particules restent cependant peu nombreuses et leurs réflectances sont faibles ($R_0 < 0,4 \%$). Leur confusion avec certaines particules organiques, de type DG et DGO, appartenant à la MOF (figure IV-58)⁷² est donc difficilement envisageable.

⁷¹ La préservation de ce type de tissus est accrue par la stabilité, la résistance et la nature hydrophobique de la lignine (Tyson, 1995).

⁷² Notons que les réflectances des particules fossiles n'évoluent pas de façon notable lors de l'altération.

MOR	DBO		Oxydation		Hydrolyse	
	Perte	Apparition	Perte	Apparition	Perte	Apparition
LCT	----		----		----	
LCDG	---		--		---	
LCDs	- ?	+ ?	-		- ?	+ ?
MOAgc	---		----		----	
AG		++++		++++		+++
AGO				+		++++
DGR		+		+		+
mbr	----		----		----	
Pertes globales de MOR et devenir	Perte de 30 % Dissolution puis minéralisation partielle		Perte de 20 % Minéralisation		Perte de 25 % Dissolution ou minéralisation?	

Tableau IV-26 : Bilan de l'altération de la MOR, les - traduisent l'intensité des pertes et les + celle des apparitions.

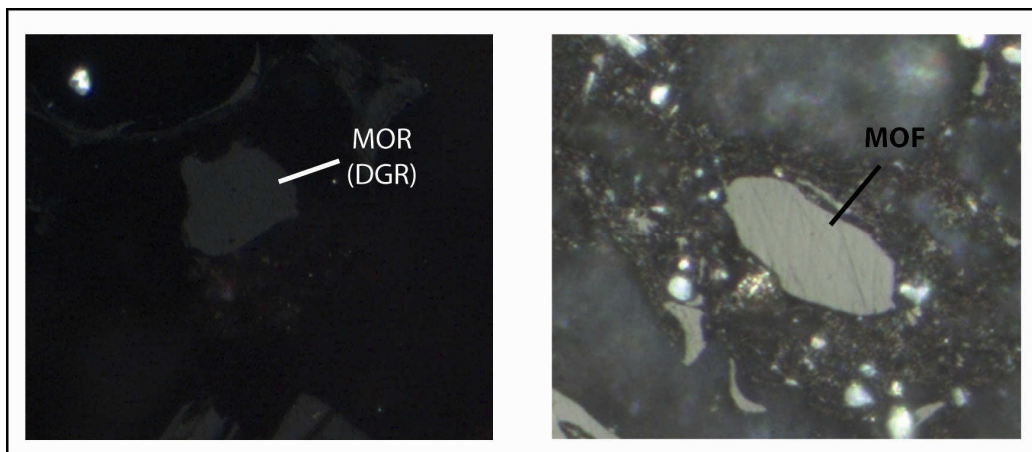


Figure IV-57 : Comparaison de particules réfléchissantes appartenant à la MOR (DGR) et à la MOF (DG ou LCO).

B-5-2) Dégradation de la MOF

Les résultats fournis par l'altération expérimentale de la MOF sont résumés dans le tableau IV-27.

Ils montrent que la MOF est elle aussi sensible aux altérations supergènes. Cette sensibilité dépend à la fois de la nature des ces altérations, mais aussi de la nature des particules organiques la constituant.

Les altérations bactérienne et oxydative ont un impact relativement limité sur la MOF, et les pertes massiques en Corg atteignent difficilement 10 %. Les pertes observées durant l'hydrolyse sont par contre plus importantes et dépassent 30 %. Ces pertes apparaissent comme majoritairement issues d'une minéralisation du Corg dans le cas de la dégradation bactérienne et de l'oxydation, tandis que celles observées lors de l'hydrolyse traduiraient une dissolution du matériel organique.

Le comportement des particules de MOF face aux altérations nous invite à distinguer les particules altérées, et les particules produites :

Particules altérées :

- Les LCO semblent être les particules les plus résistantes aux trois types de dégradation. Leurs pertes sont faibles, voire nulles durant l'oxydation.
- Les MOAr apparaissent aussi résistantes face à l'oxydation, mais les pertes peuvent atteindre 30, voire 40 % lors de l'hydrolyse.
- Les DG et Pyrites sont extrêmement sensibles aux trois types d'altérations. Les pertes atteignent en effet rapidement 80 %, voire plus, lors des dégradations bactérienne et oxydative, mais elles se limitent à 60 % lors de l'hydrolyse.

Particules produites :

- Des particules semblables aux MOAr, mais de plus grande dimension, apparaissent dans les produits de dégradation de l'altération bactérienne. Leur observation en lumière réfléchie sur sections polies révèle la présence presque systématique de particules réfléchissantes, que nous pouvons associer à des LCO, en leur sein. Ces particules, qualifiées de « groupes », pourraient être des produits de transformation des LCO et MOAr.

- Les pertes en DG semblent être compensées par la surconcentration en LCO lors de l'oxydation (à 2 et 3 mois). Certains LCO résulteraient donc d'une transformation des DG par oxydation et opacification.

MOF	DBO		Oxydation		Hydrolyse
	Perte	Apparition	Perte	Apparition	Perte
LCO	-		=	+ ?	-
MOAR	-		=		--
DG	----		----		----
Groupes		++			
Pyrite	----		----		----
Pertes globales de MOF et devenir	Perte de 10 % Minéralisation		Perte de 10 à 20 % Minéralisation		Perte de 30 % Dissolution

Tableau IV-27 : Bilan de l'altération expérimentale de la MOF, les - traduisent l'intensité des pertes et les + celle des apparitions.

C) Confrontation des données obtenues sur le terrain et par expérimentation

La confrontation des données obtenues expérimentalement et sur le terrain nous permet de discuter de l'importance et du devenir des pertes observées sur le terrain. Cette discussion sera essentiellement focalisée sur le cas de la MOF.

C-1) Cas de la MOR

L'étude des profils Roches / Altérites / Sols, nous avait permis de mettre en évidence l'importante labilité de la MOR face aux altérations (cf. § IV-A-5-4). Celle-ci se traduit notamment par de fortes pertes en LC, AG, éléments figurés et MOAgc. Nous avons cependant noté une nette augmentation de la proportion relative d'AG au sein de cette MO lors des transferts Humus / Horizons A / Terres fines⁷³. L'altération expérimentale permet, -1) de confirmer la labilité des différents composants de la MOR ; et -2) de montrer que les AG peuvent être des produits de l'altération des autres types de particules.

Par contre, nous avons remarqué durant les dégradations expérimentales la formation d'AGO et de DGR qui ne sont pas observés dans les échantillons naturels. Il s'agit vraisemblablement d'artefacts expérimentaux. Les AGO apparaissent préférentiellement lors de l'hydrolyse, et sont vraisemblablement issus d'AG, dont la densité a fortement augmenté sous l'effet de la pression au sein des autoclaves. Les DGR apparaissent en faible quantité lors des trois types d'altération et peuvent être interprétées comme des contenus gélifiés de cellules végétales (Meyers et Lallier-Verges, 1999). Ces particules résulteraient donc d'un mécanisme de « fractionnement » de matériel organique qui ne semble pas prévaloir en conditions naturelles.

Enfin, il convient de noter qu'aucune particule de MOR, dégradée ou transformée, ne peut être confondue avec les particules constituant la MOF.

⁷³ Ce phénomène peut avoir deux origines : 1) une perte massique différentielle des particules, 2) le fait que les AG sont un produit de dégradation des autres particules.

C-2) Cas de la MOF

C-2-1) Pertes globales et transformations potentielles de la MOF

Les résultats de l'expérimentation et de l'étude des profils d'altération concordent sur de nombreux aspects.

En premier lieu, les pertes massiques globales atteignent, au maximum, une trentaine de % lors de l'hydrolyse, et lors des transferts Altérites / Terres fines et Altérites / Sols.

En deuxième lieu, nous remarquons une classification identique des particules selon leurs réponses aux altérations. En effet, quelque soit l'approche utilisée, nous distinguons (figure IV-59) :

- les LCO qui apparaissent comme les particules les plus résistantes. Leurs pertes maximales « effectives » se limitent à 13-20 % lors de l'hydrolyse et des transferts Altérites / Terres fines et Altérites / Sols ;
- les MOAr qui apparaissent un peu plus sensibles. Leurs pertes atteignent, voire dépassent, 40 % lors de l'hydrolyse et des transferts Altérites / Terres fines et Altérites / Sols ;
- les DG qui représentent les particules les plus labiles. Leurs pertes atteignent 80 % lors de l'altération bactérienne et l'oxydation expérimentale, 60 % lors de l'hydrolyse, et plus de 60 % lors des transferts Altérites / Terres fines et Altérites / Sols ;
- la pyrite qui est caractérisée, tant sur le terrain que lors des expérimentations, par des pertes brutales et rapides pouvant atteindre 100 % (sols et terres fines).

Nous notons, enfin, une possible transformation des particules durant les altérations supergènes :

- l'étude des profils 06-LA A et LA A R nous a permis d'observer une perte en DG (de l'ordre de 0,002 PNA, soit 20 %), compensée par une surconcentration en LCO équivalente. Un mécanisme similaire a été mis en évidence lors de l'oxydation expérimentale, montrant que certains LCO peuvent résulter d'une oxydation et opacification de DG ;
- l'étude du profil 06-BRU S3 nous a permis d'observer une chute progressive des LCO au profit des MOAr le long d'une seule et même lamine de marne, suggérant une amorphisation des premiers. Un mécanisme similaire est observé lors de la dégradation bactérienne expérimentale, montrant la formation des particules amorphes qualifiées de «groupes ».

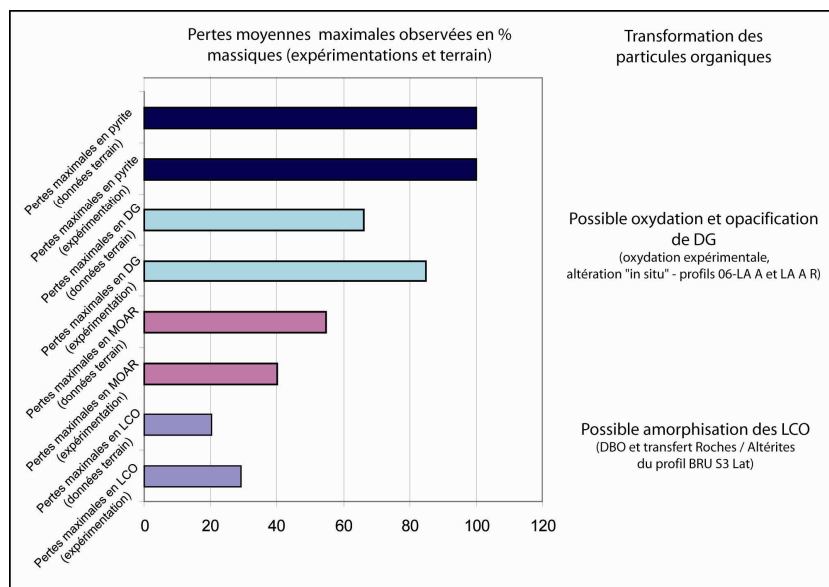


Figure IV-58 : Classement des particules selon leur labilité à partir des pertes moyennes maximales observées sur le terrain et par expérimentation.

C-2-2) Altérations « in situ » versus altérations expérimentales

Il nous est paru tentant de déterminer quels processus majeurs (dégradation bactérienne, oxydation, hydrolyse) conduisent les altérations observées en contexte naturel, lors des différents transferts entre compartiments. Deux approches complémentaires, fondées sur les résultats obtenus « in situ » ou par voie expérimentale, ont été conduites.

Première approche : Cette approche prend en compte les pertes maximales (en % massiques) des particules de MO après dégradation (terrain et expérimentation).

- Le transfert Roche / Altérites (PL) n'a que peu ou pas d'effet quantitatif sur la MOF
- Le transfert Altérites (PL) / Terres fines voit des pertes en MOF, en MOAr, et en DG à priori mieux reproduites par l'hydrolyse expérimentale (LCO exceptés, figure IV-60a)
- Le transfert Altérites (PL) / Sols voit, aussi, une nette correspondance entre les pertes en MOF, en LCO, en MOAr, et en DG avec celles observées suite à l'hydrolyse expérimentale (figure IV-60b).
- Le transfert Roches / Particules fluviatiles n'est l'objet d'aucune altération et les éléments les plus labiles (pyrites et DG) restent présents au sein des échantillons de MES et CF étudiés.

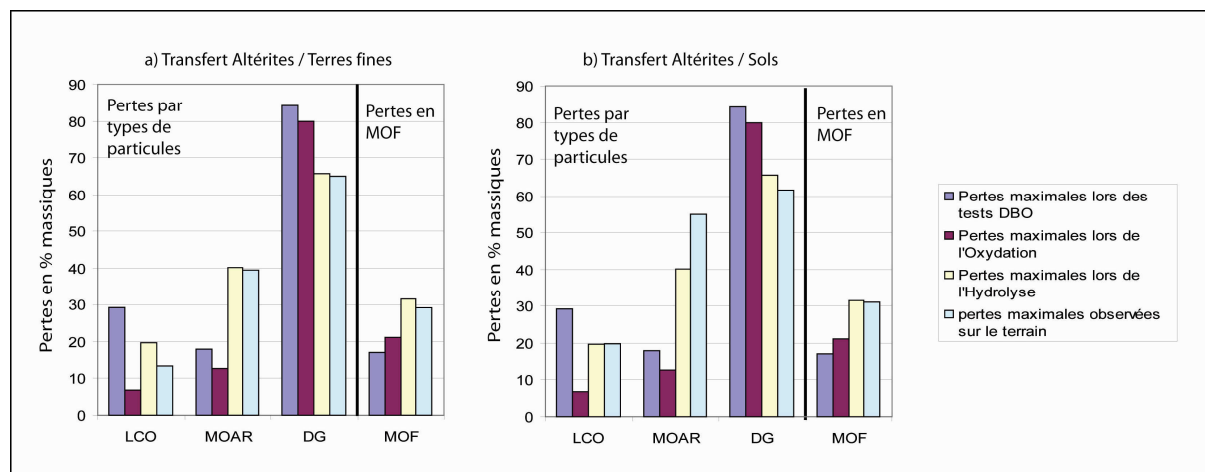


Figure IV-60 : Comparaison des pertes moyennes maximales observées sur le terrain lors des transferts Altérites / Terres fines (a) et Altérites / Sols (b) avec les pertes obtenues par expérimentation.

Deuxième approche : Cette approche s'appuie sur les contributions massiques individuelles des particules (LCO, MOAR et DG) au sein des pertes massiques cumulées.

$$\text{eq 8) Contribution de la particule (\%)} = \frac{\text{Perte massique de la particule} \times 100}{\text{Perte massique cumulée des LCO, MOAR et DG}}$$

Les résultats, obtenus sur des échantillons normés⁷⁴, sont exprimés sous la forme de diagrammes triangulaires dont les trois pôles représentent les contributions massiques maximales des particules LCO, MOAR et DG (figure IV 61 a : pertes maximales observées sur les profils d'altération de bassin du Laval, b : pertes maximales observées sur l'ensemble des profils étudiés).

L'examen des résultats autorise une nette discrimination des altérations expérimentales :

- l'oxydation se traduit, en effet, par une plus forte contribution des DG au sein de la perte cumulée (LCO, MOAR et DG) ;
- l'altération bactérienne se traduit par une contribution particulièrement faible des pertes en MOAR ;
- l'hydrolyse se traduit par des contributions relativement équilibrées des particules LCO, MOAR et DG.

⁷⁴ Nous avons affecté les pertes observées sur le terrain, et par expérimentation, à un échantillon de composition initiale identique à celle de 06-LA S2 PL 135 cm.

Comparativement, les pertes observées sur le terrain lors des transferts Altérites / Terres fines et Altérites / Sols semblent globalement plus proches de celles obtenues lors de l'hydrolyse expérimentale.

L'altération « in situ » (six mois passée entre les échantillonnages des profils 06-LA A et LA A R) se traduit par des pertes n'affectant que les DG. De fait, cette altération se positionne sur le pôle DG du diagramme, au plus proche de la signature de l'oxydation expérimentale.

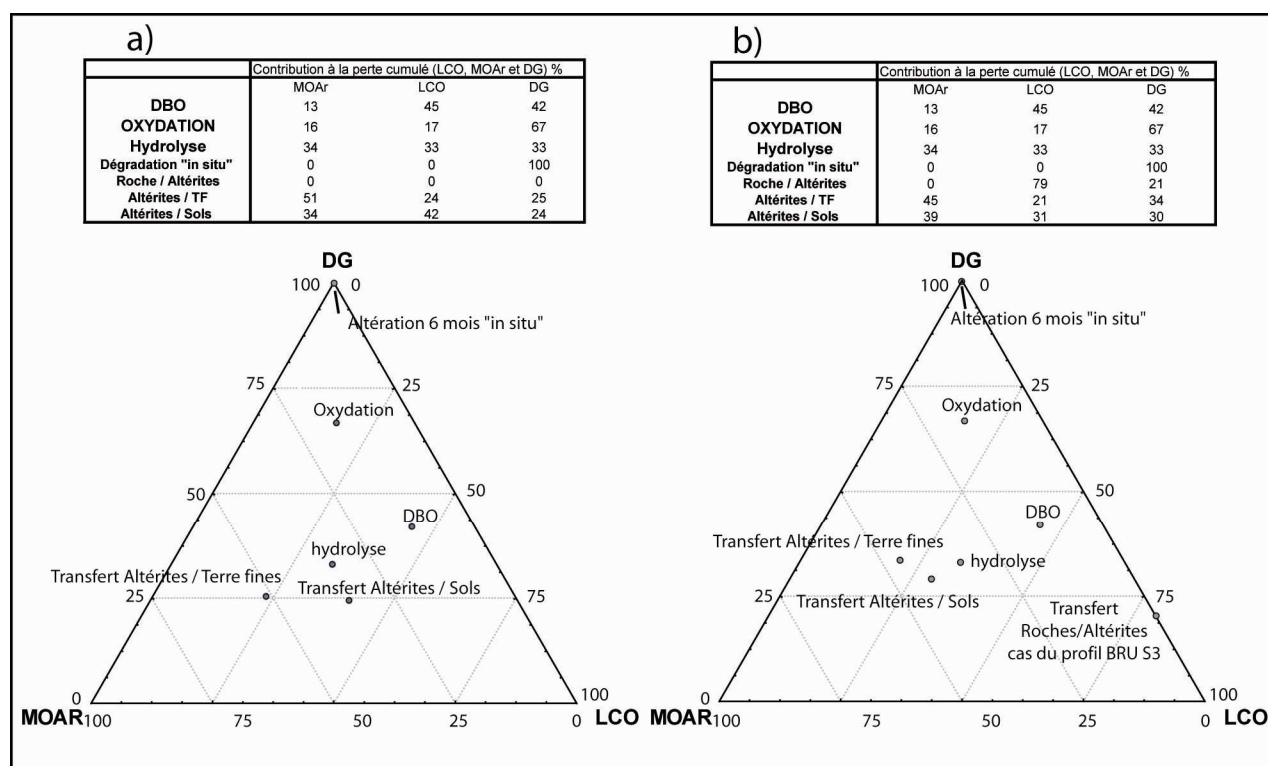


Figure IV-61: Diagrammes triangulaires représentant les contributions de chaque constituant de la MOF au sein des pertes massiques cumulées (LCO, MOAr et DG) ; résultats normés à la composition initiale de l'échantillon 06-LA S2 PL 135 cm :

- a) pertes maximales observées sur les profils d'altération de bassin du Laval
- b) pertes maximales observées sur l'ensemble des profils d'altération étudiés.

Les constats obtenus selon les deux approches sont bien évidemment préliminaires, mais ils apparaissent concordants. Nous concluons donc sur trois points :

- 1) les altérations de MOF subies lors des transferts Altérites / Terres fines et Altérites / Sols semblent, pour une large part, dominées par l'hydrolyse ;
- 2) le transfert Roches / Altérite semblent parfois être le lieu d'une altération bactérienne ;
- 3) le premier processus affectant la roche mise à l'affleurement semble être l'oxydation.

Une remarque peut être formulée : il peut paraître surprenant que la dégradation bactérienne ne soit pas un processus dominant l'altération de la MOF lors des transferts Altérites / Terres fines et Altérites / Sols, malgré le fait ces compartiments sont, à priori, les lieux les plus probables d'activité biologique. Une hypothèse pourrait être que les bactéries s'y concentrent préférentiellement sur la MOR, qui est d'ailleurs très fortement dégradée dans ces compartiments. Leur action sur la MOF devient plus visible lors du transfert Roche / Altérite, où la MOR est absente.

C-2-3) Devenir de la MOF lors des transferts entre compartiments

La connexion entre les processus (altération bactérienne, hydrolyse et oxydation) avec les transferts entre compartiments permet d'avancer sur le problème du devenir des pertes observées sur le terrain (dissolution et / ou minéralisation, figure IV-62).

Nous avons, en effet, suggéré (cf. § IV-B-5-2) que les pertes massiques observées durant l'oxydation expérimentale et les tests DBO (altération bactérienne) traduisent une minéralisation de la MOF, tandis que celles observées durant l'hydrolyse s'expliqueraient plutôt par une dissolution.

Sur cette base, il se pourrait que les transferts Altérites / Terres fines et Altérites / Sols entraînent plutôt une dissolution de la MOF, tandis que le transfert Roches / Altérites privilégierait une minéralisation.

Ces premières hypothèses méritent bien évidemment d'être confirmées, mais elles suggèrent cependant que minéralisation et dissolution sont deux devenir possibles de la MOF, fonctions de sa position au sein des compartiments étudiés. Toutefois, le caractère très préliminaire de ces résultats fait qu'aucune généralisation ne peut, pour l'heure, être effectuée à l'échelle des bassins versants de Draix.

Types de transferts Pertes maximales et / ou transformation des particules de MO	Processus principal probable	Devenir probable des pertes
Altérites (PL) / Sols 32%	Hydrolyse	Dissolution
Altérites (PL) / Terres fines 28%	Hydrolyse	Dissolution
Roches / Altérites (PL) Amorphisation possible des LCO	Altération bactérienne	Minéralisation
Roches / Particules fluviatiles Pas de pertes	Transfert direct	Pas de dissolution, ni de minéralisation
Altération "in situ" (six mois) Opacification possible des DG en LCO	Oxydation	Minéralisation

Figure IV-62 : Synthèse de la confrontation de données obtenues sur le terrain, et par expérimentations. Pertes de MOF observées sur le terrain lors des différents transferts entre compartiments ; processus principaux probables (altération bactérienne, hydrolyse ou oxydation) et devenirs probables de la MO perdue (dissolution ou minéralisation).

C) Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre permettent de conclure selon deux axes majeurs.

Le premier concerne le problème de la MOF libérée par les formations géologiques de Draix.

Cette MOF est présente dans l'ensemble des compartiments étudiés, avec des contributions massiques significatives atteignant, en moyenne, de 5 à 10 mg/g dans les roches, de 4 à 7 mg/g dans les plaquettes d'altérites, 6 à 7 mg/g dans les terres fines (tableau IV-28) et environ 6 mg/g dans les particules fluviales (tableau IV-29).

Roches Compartiments	Callovo-oxfordien	Toarcien	Aalénien supérieur
Sols (horizons A)	3,7 mg/g	5,1 mg/g	3,8 mg/g
Terres fines	5,8 mg/g	6,8 mg/g	5,8 mg/g
Altérites (PL)	5,3 mg/g	5,7 mg/g	5,7 mg/g
Roches	5,1 mg/g	10,3 mg/g	5,5 mg/g

Tableau IV-28 : Contributions massiques moyennes de MOF(en mg MOF / g d'échantillon) dans les compartiments Roches, Altérites, Terres fines et Sols des bassins de Draix.

	Particules fluviales du Laval	Particules fluviales du Brusquet	Particules fluviales du Moulin
MOF mg/g	6,1 mg/g	6,2 mg/g	5,4 mg/g

Tableau IV-29 : Contributions massiques moyennes de MOF(en mg MOF / g d'échantillon) dans les particules fluviales des bassins de Draix.

Les transferts entre compartiments s'accompagnent de pertes et / ou transformations des particules composant la MOF, fonctions de la nature des constituants organiques, mais aussi de la nature du transfert. Nous remarquons, en effet, sur le terrain et par voie expérimentale, un gradient de labilité allant des LCO aux DG, avec une possibilité de transformation entre ces classes de particules (amorphisation de LCO, opacification de DG en LCO).

Ces différences n'empêchent pas de dégager les tendances générales sur le comportement de la MOF lors des divers transferts. Ainsi, le transfert Roches / Particules fluviales ne possède aucun impact sur la MOF ; le transfert Roches / Altérites se traduit par une très faible minéralisation de la MOF, en dépit d'une dégradation biologique effective conduisant à une transformation des LCO ; les transferts Altérites (PL) / Terres fines et Altérites (PL) / Sols entraînent les pertes maximales en MOF (30 %), vraisemblablement évacuées sous forme dissoute (hydrolyse).

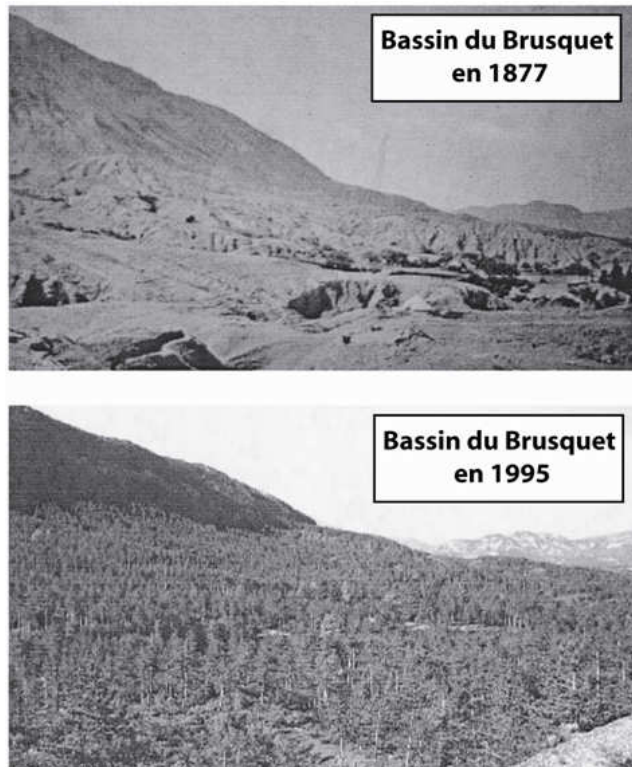
Le deuxième axe concerne les possibilités d'élargissement de ce travail à d'autres études.

Celles-ci sont multiples :

- 1) le palynofacies quantitatif, lié à l'analyse ICP, s'avère être une méthode performante pour l'analyse des stocks et flux de MO sur la surface des continents ;
- 2) la confrontation des données de terrain, et des dégradations expérimentales, témoigne de la reproductivité, et de l'applicabilité de l'approche expérimentale pour répondre à des questions similaires sur d'autres bassins versants ;
- 3) les données, ou résultats, obtenus sur les particules organiques, en termes de densité et de dégradabilité, peuvent être utilisés sur d'autres sites car ces particules sont classiquement reconnues dans les formations géologiques, les couvertures pédologiques et les sédiments continentaux.

Chapitre V

Flux de COF libéré par les altérations supergènes



Depuis trois ans il plantait des arbres dans cette solitude. Il en avait planté cent mille. Sur les cent mille, vingt mille étaient sortis. Sur ces vingt mille, il comptait encore en perdre la moitié, du fait des rongeurs ou de tout ce qu'il y a d'impossible à prévoir dans les desseins de la Providence. Restaient dix mille chênes qui allaient pousser dans cet endroit où il n'y avait rien auparavant. (Extrait de « l'homme qui plantait des arbres », J. Giono).

Où l'on raisonne en t/ha/an...

Nous avons, dans les précédents chapitres, mis en évidence la résistance du COF face aux altérations supergènes, puis quantifié les pertes associées aux différents transferts entre compartiments (roches, altérites, sols et particules fluviatiles). L'étape suivante de ce travail consiste à proposer des bilans et flux de COF affectés par ces altérations à l'échelle des sites étudiés.

Ce chapitre comporte trois volets. Le premier porte sur le calcul, pour chaque bassin versant, des flux annuels de COF libéré par les altérations mécaniques et chimiques des roches. Le second propose diverses modélisations de ces flux en fonction des paramètres simples que sont la végétation, la pente et les précipitations. Le troisième volet développe quelques applications possibles de ces modélisations : -1) une proposition d'évolution temporelle des flux depuis 200 ans ; et -2) un test de la représentativité des petits bassins versants (échelle locale) sur de plus grandes unités (échelle régionale).

A) Flux de COF à l'échelle des bassins versants

Le présent chapitre traite des flux annuels de COF libéré par les altérations mécaniques (FmCOF) et chimiques (FcCOF) des roches.

Les FmCOF correspondent à la masse de COF contenue dans les roches affectées par l'altération mécanique et directement exportée des bassins au sein des particules fluviales.

Les FcCOF expriment la masse de COF contenue dans les roches affectées par l'altération chimique. Le devenir de cette masse est pour l'heure inconnue, celle-ci pouvant être en effet minéralisée (flux de CO₂ vers l'atmosphère), dissoute (potentiellement exporté des bassins dans les eaux) ou stockée au sein des résidus insolubles.

A-1) Les flux de COF libéré par l'altération mécanique

L'obtention de flux de COF libéré annuellement par l'altération mécanique (FmCOF) et exporté au sein des particules fluviales requiert deux conditions préalables :

- 1) la possession de chroniques d'exports solides (MES et CF) aux exutoires des bassins ;
- 2) la connaissance des teneurs en COF de ces MES et CF pour chaque bassin.

A-1-1) Les chroniques d'exports solides aux exutoires des bassins

Les bassins versants du Laval, du Brusquet, de la Roubine, et du Moulin ont successivement été équipés depuis 1983 par le Cemagref afin de mesurer les flux solides à leurs exutoires (cf. § II-A-4). Ces mesures ont permis d'obtenir, sur une vingtaine d'années environ, les flux annuels rapportés aux surfaces dénudées de chaque bassin (Klotz, 2005 ; Mathys, 2006). Considérant, cependant, que tout type de surface (dénudée ou non) possède un impact sur les flux, nous avons corrigé ces derniers en les rapportant aux surfaces totales des bassins versants (figure V-1).

Nous remarquons que ces flux sont extrêmement variables, d'une année à l'autre, mais aussi d'un bassin à l'autre. Ainsi les exports solides mesurés évoluent entre 43,5 et 211,51

t/ha/an pour le Laval, 0,03 et 2,2 t/ha/an pour le Brusquet, 70,3 et 276,5 t/ha/an pour la Roubine et 13,5 et 199,6 t/ha/an pour le Moulin. Les moyennes interannuelles atteignent 117,9 , 0,7 , 134,2 et 59,8 t/ha/an.

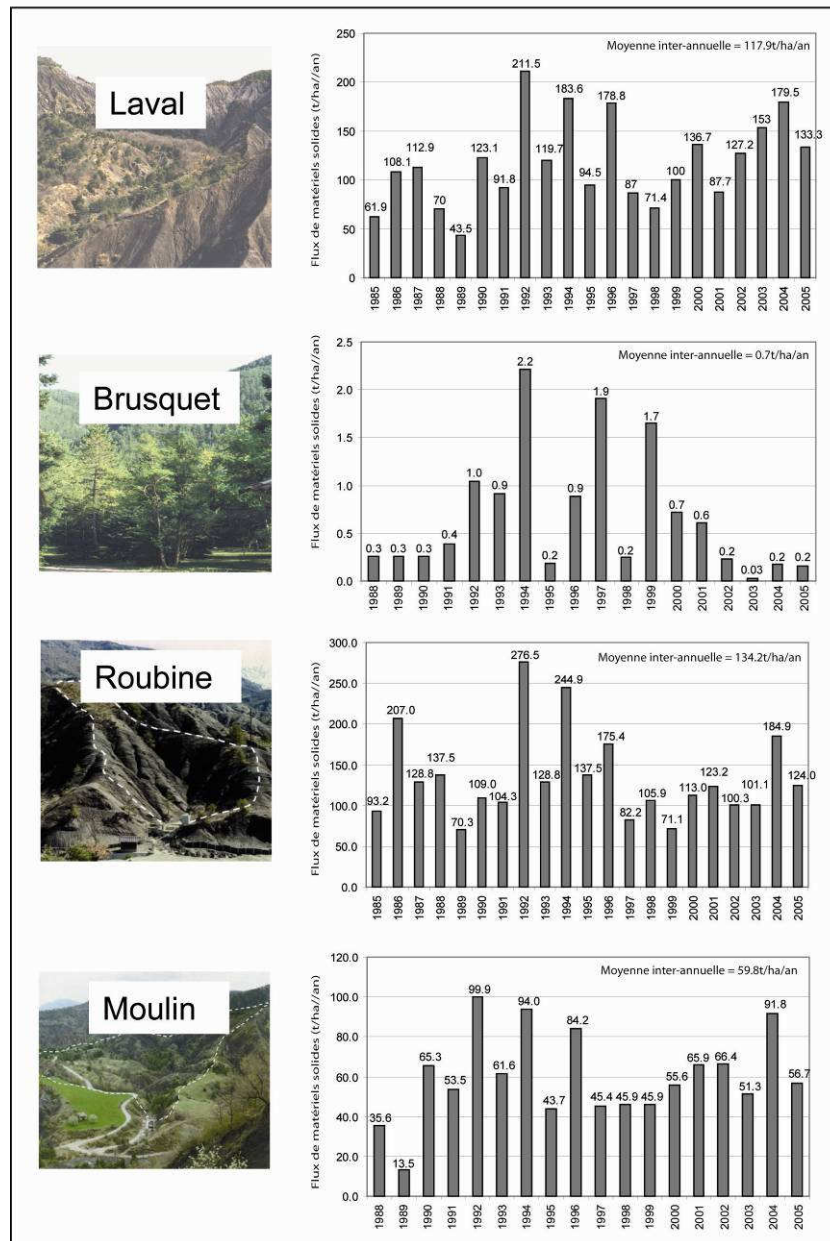


Figure V-1: Chroniques d'exports solides rapportées aux surfaces totales des bassins versant de Draix (données corrigées à partir des données de Klotz, 2005).

A-1-2) Le contenu en Corg des particules fluviatiles

Les résultats obtenus par palynofacies quantitatif montrent que l'altération mécanique des roches est responsable d'un transfert direct, des roches vers les particules fluviatiles, sans perte de MOF, ni de pyrite.

Si ce premier résultat suggère une égalité des teneurs en COF au sein des roches et particules fluviatiles (0,5% en moyenne), nous notons cependant que la teneur moyenne en COF obtenue pour les particules fluviatiles ne se base que sur trop peu de mesures (10 échantillons pour le bassin du Laval, 4 pour le Brusquet et 7 pour le Moulin, tous prélevés entre 2006 et 2008).

Afin de palier à ce problème, il nous a été nécessaire :

- 1) d'estimer les teneurs en COF au sein d'un plus grand nombre d'échantillons ;
- 2) de tester la variabilité temporelle de ces teneurs (saisonnière et annuelle).

A-1-2-1) L'utilisation de l'IH comme indicateur des teneurs en MOR

La pyrolyse Rock-Eval ayant systématiquement été effectuée sur les différents échantillons de MES et CF, nous avons tenté de confronter les résultats issus de cette dernière avec ceux du palynofacies quantitatif.

Cette confrontation, établie à partir de 156 échantillons (roches, plaquettes, terres fines et particules fluviatiles), est exprimée sous la forme du diagramme IH (pyrolyse Rock-Eval) / % de MOR (palynofacies quantitatif) (figure V-2). Nous observons une excellente corrélation entre ces paramètres ($R^2 = 0,92$) et pouvons définir la relation suivante :

$$\text{eq 1) IH (mg HC.g}^{-1}\text{COT)} = 2,1175 \times \text{MOR (\%)} + 6,9645$$

Ainsi, il apparaît ainsi que les valeurs d'IH obtenues sur les échantillons de terres fines, horizons A et particules fluviatiles sont représentatives du % de MOR.

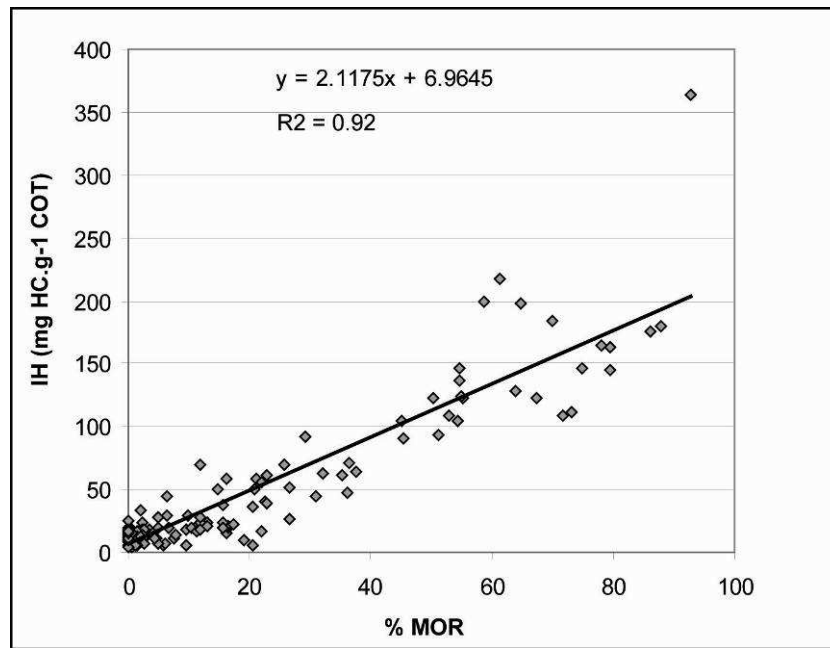


Figure V-2 : Relation entre l'IH et le % de MOR pour les échantillons des bassins versant de Draix.

Cette relation établie⁷⁵, nous pouvons calculer les % de MOR et de MOF sur l'ensemble des échantillons de particules fluviatiles pour lesquelles nous disposons de données Rock-Eval (soit 80 échantillons). En interpolant ces % au COT⁷⁶, nous obtenons ainsi les parts respectives issues du matériel fossile (COTf) et récent (COTr) au sein des échantillons (Tableau V-1 et figure V-3).

Les résultats de cette interpolation confirment ceux obtenus par palynofacies quantitatif. Les COTf des particules fluviatiles sont en effet relativement constants et proches de 0,5% pour l'ensemble des échantillons étudiés.

⁷⁵ Le fait que les points soient alignés sur une droite signifie que l'IH de la MOR des échantillons est stable. Ceci peut paraître quelque peu surprenant compte tenu des résultats précédemment présentés (cf. § III-D-1-2-1), montrant une chute des IH lors de la dégradation pédologique de la MOR. Cette chute ne serait donc effective qu'au sein des humus (chute des IH de 500 à 300 mg HC.g⁻¹COT lors des transferts OL / OF / OH) et se stabiliserait ensuite autour de 200 mg HC.g⁻¹COT dès les horizons A.

⁷⁶ Ce calcul constitue bien évidemment une approximation, compte tenu des rapports MO/Corg différents pour les MOR et MOF (cf. § IV-A-5-1-2).

Echantillons	TOC r (%)	TOCf (%)	Echantillons	TOC r (%)	TOCf (%)
Laval MES 03/05/2002a	0.05	0.50	Laval MES 20/10/2006b	0.05	0.48
Laval MES 03/05/2003b	0.06	0.45	Laval MES 20/10/2006c	0.05	0.47
Laval MES 13/05/2002	0.08	0.47	Laval MES 07/12/2006a	0.04	0.48
Laval MES 24/05/2002	0.05	0.46	Laval MES 07/12/2006b	0.04	0.48
Laval MES 26/08/2002	0.07	0.46	Laval MES 04/06/2007	0.07	0.47
Laval MES 02/09/2002	0.05	0.47	Laval MES 05/06/2007b	0.07	0.53
Laval MES 05/09/2002	0.05	0.45	Laval MES 05/06/2007a	0.05	0.57
Laval MES 23/10/2002	0.04	0.51	Laval MES 16/09/2007	0.04	0.49
Laval MES 06/07/2006	0.03	0.44	Laval MES 22/11/2007	0.03	0.45
Laval MES 07/07/2006	0.05	0.51	Laval MES 11/01/2008a	0.05	0.56
Laval MES 12/07/2006b	0.05	0.60	Laval MES 11/01/2008b	0.04	0.51
Laval MES 12/07/2006a	0.03	0.53	Laval MES 11/01/2008c	0.05	0.48
Laval MES 18/07/2006b	0.03	0.43	Laval CF 24/09/1999a	0.02	0.47
Laval MES 18/07/2006a	0.03	0.48	Laval CF 24/09/1999b	0.01	0.45
Laval MES 08/09/2006	0.04	0.58	Laval CF 24/09/1999c	0.06	0.53
Laval MES 15/09/2006	0.04	0.48	Laval CF 20/11/2006a	0.01	0.41
Laval MES 25/09/2006	0.03	0.55	Laval CF 20/11/2006b	0.02	0.43
Laval MES 20/10/2006a	0.05	0.49	Laval CF 20/11/2006c	0.04	0.56
Echantillons	TOC r (%)	TOCf (%)	Echantillons	TOC r (%)	TOCf (%)
Brusquet MES 03/05/2002a	0.32	0.68	Brusquet MES 24/09/2006	0.42	0.64
Brusquet MES 03/05/2002b	0.40	0.68	Brusquet MES 21/10/2006	0.45	0.61
Brusquet MES 23/05/2002	0.52	0.56	Brusquet MES 06/12/2006	0.53	0.68
Brusquet MES 25/05/2002	2.31	-0.99	Brusquet MES 17/12/2006	0.54	0.49
Brusquet MES 04/09/2002a	0.65	0.53	Brusquet CF 24/09/1999a	0.09	0.66
Brusquet MES 04/09/2002b	0.27	0.47	Brusquet CF 24/09/1999b	0.15	0.62
Brusquet MES 17/09/2002	0.79	0.28	Brusquet CF 24/09/1999c	0.23	0.63
Brusquet MES 12/07/2006a	0.18	0.56	Brusquet CF 24/09/1999d	0.01	0.56
Brusquet MES 12/07/2006b	0.38	0.69	Brusquet CF 20/11/2006 Aalénien sup	0.01	0.45
Brusquet MES 12/07/2006d	0.17	0.67	Brusquet CF 20/11/2006 Toarcien	0.00	0.69
Echantillons	TOC r (%)	TOCf (%)	Echantillons	TOC r (%)	TOCf (%)
MES Moulin 13/05/2002	0.18	0.42	MES Moulin 08/09/2006b	0.03	0.51
MES Moulin 03/05/2002	0.06	0.50	MES Moulin 15/09/2006a	0.04	0.49
MES Moulin 05/08/2002	0.05	0.48	MES Moulin 15/09/2006b	0.04	0.49
MES Moulin 27/08/2002a	0.09	0.45	MES Moulin 24/09/2006	0.03	0.49
MES Moulin 27/08/2002b	0.05	0.46	MES Moulin 20/10/2006a	0.10	0.43
MES Moulin 02/09/2002	0.10	0.46	MES Moulin 20/10/2006b	0.12	0.46
MES Moulin 05/09/2002	0.08	0.47	MES Moulin 07/12/2006	0.04	0.47
MES Moulin 12/09/2002	0.07	0.47	MES Moulin 05/06/2007a	0.03	0.55
MES Moulin 06/07/2006a	0.04	0.49	MES Moulin 05/06/2007b	0.08	0.44
MES Moulin 06/07/2006b	0.11	0.51	MES Moulin 23/11/2007	0.04	0.49
MES Moulin 12/07/2006	0.03	0.51	MES Moulin 12/01/2008a	0.07	0.51
MES Moulin 08/09/2006a	0.04	0.50	MES Moulin 12/01/2008b	0.04	0.46

Tableau V-1 : COTr et COTf calculés pour l'ensemble des particules fluviatiles des bassins versants de Draix.

Trois points méritent cependant d'être soulignés :

-1) Les COTf des échantillons du Brusquet sont couramment plus importants que ceux des autres bassins versants (0,7 contre 0,5%)⁷⁷. Cette valeur correspond à celle mesurée dans certaines marnes noires présentes dans le bassin et datant du Toarcien (base des profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat, échantillons B2, B3, B4 et B5, cf. § III-C-3-2-1 et § III-C-3-2-4). Il semblerait donc que cette formation soit la source principale des MES et CF.

⁷⁷ Le COTf négatif de l'échantillon Brusquet MES 25/05/2002 peut s'expliquer par l'important IH de cet échantillon (378 mg HC.g⁻¹COT), révélant la forte contribution de MOR au sein de cet échantillon (certainement issue de l'érosion d'humus). La relation IH / % MOR ne s'applique pas dans ces conditions. Le même phénomène semble être observé, avec une moindre ampleur, pour l'échantillon Brusquet MES 19/09/2002 (COTf de 0,28%).

-2) Le COTr apparaît comme dépendant du taux de végétalisation. Il est extrêmement faible au sein des échantillons du Laval (0,04 % en moyenne pour un taux de végétalisation de 32 %) et du Moulin (0,07 % en moyenne pour un taux de végétalisation de 46 %), et nettement plus conséquent dans ceux du Brusquet (0,32 % en moyenne pour un taux de végétalisation de 87 %).

-3) Les âges obtenus par datation C^{14} sur les échantillons de MES du Laval et du Brusquet (du 12/07/2006, cf. § III-B-4-5) apparaissent être en relation directe avec les rapports COTf / COTr. Cet âge est, en effet, particulièrement ancien (21700 ± 240 BP) pour l'échantillon du Laval possédant un rapport COTf / COTr de 12 ; il est beaucoup plus récent (9880 ± 60 BP) pour l'échantillon du Brusquet possédant un rapport COTf / COTr de 2.

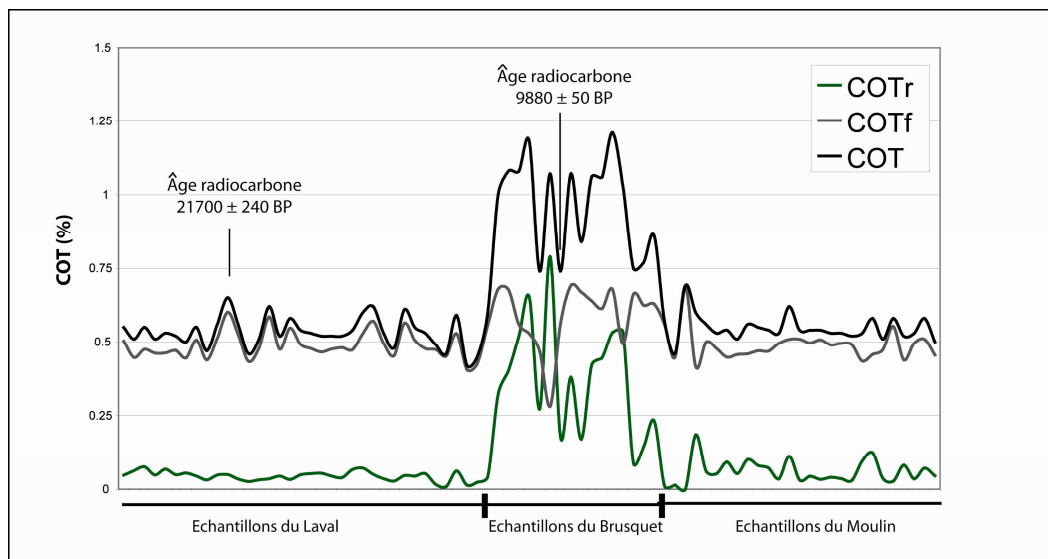


Figure V-3 : COTr et COTf calculés pour l'ensemble des particules fluviales des bassins versants de Draix et âges C^{14} mesurés.

A-1-2-2) Variabilité temporelle du contenu en Corg des MES et CF

L'important nombre de particules fluviales analysées par pyrolyse Rock-Eval permet de tester les évolutions temporelles de leurs contenus organiques, d'une saison à l'autre, mais aussi d'une année à l'autre (figure V-4).

- *Evolution saisonnière* : Nous n'observons aucune variation, tant quantitative que qualitative, du contenu organique des particules fluviales au cours des saisons. Le COT moyen des échantillons de MES du Laval et du Moulin est de 0,54 % et les IH restent faibles (de 20 à 40 mg HC.g⁻¹COT) tout au long de l'année (figure V-4 a et c). Les Tmax sont proches de 520°C pour les échantillons du Laval, tandis que ceux des échantillons du Moulin présentent une répartition bimodale autour des valeurs de 380 et 560°C⁷⁸.

Le contenu organique des MES du Brusquet apparaît plus hétérogène, mais ne nous notons pas de tendance particulière d'une saison à une autre (figure V-4-b).

- *Evolution annuelle* : Pour les trois bassins versants, les échantillons de MES prélevés en 2002 et durant le cycle d'échantillonnage 2006-2008 sont semblables par la quantité et la qualité de leur contenu organique. Ce n'est que durant l'été que les échantillons du bassin du Moulin prélevés en 2002 diffèrent quelque peu de ceux prélevés en 2006-2008 par des IH légèrement plus forts (de l'ordre 40 contre 20 mg HC.g⁻¹COT) et des Tmax proches de 380°C. Ceci témoigne sans doute d'une contribution récente légèrement plus importante durant l'été 2002, qui n'affecte en rien le contenu fossile des échantillons.

Nous ne notons pas, non plus, de différence significative entre les échantillons CF du Laval prélevés en 1999 et en 2006. Ceux prélevés en 1999 au sein du bassin du Brusquet diffèrent par contre des échantillons prélevés en 2006 par des COT et IH plus faibles, liés vraisemblablement à de plus faibles teneurs en COR (cf. § IV-A-3-2-3).

⁷⁸ Pour des échantillons contenant majoritairement du COF, la quantité de HC mesurée par la pyrolyse Rock Eval est très faible (cf. § III-D-1-2-2). Il suffit donc de très peu de COR, plus riche en HC, au sein d'un échantillon pour que le signal change totalement d'allure. Le Tmax associé peut, de fait, passer directement d'une valeur représentative du COF (>500°C), à une autre représentative de COR (<400°C).

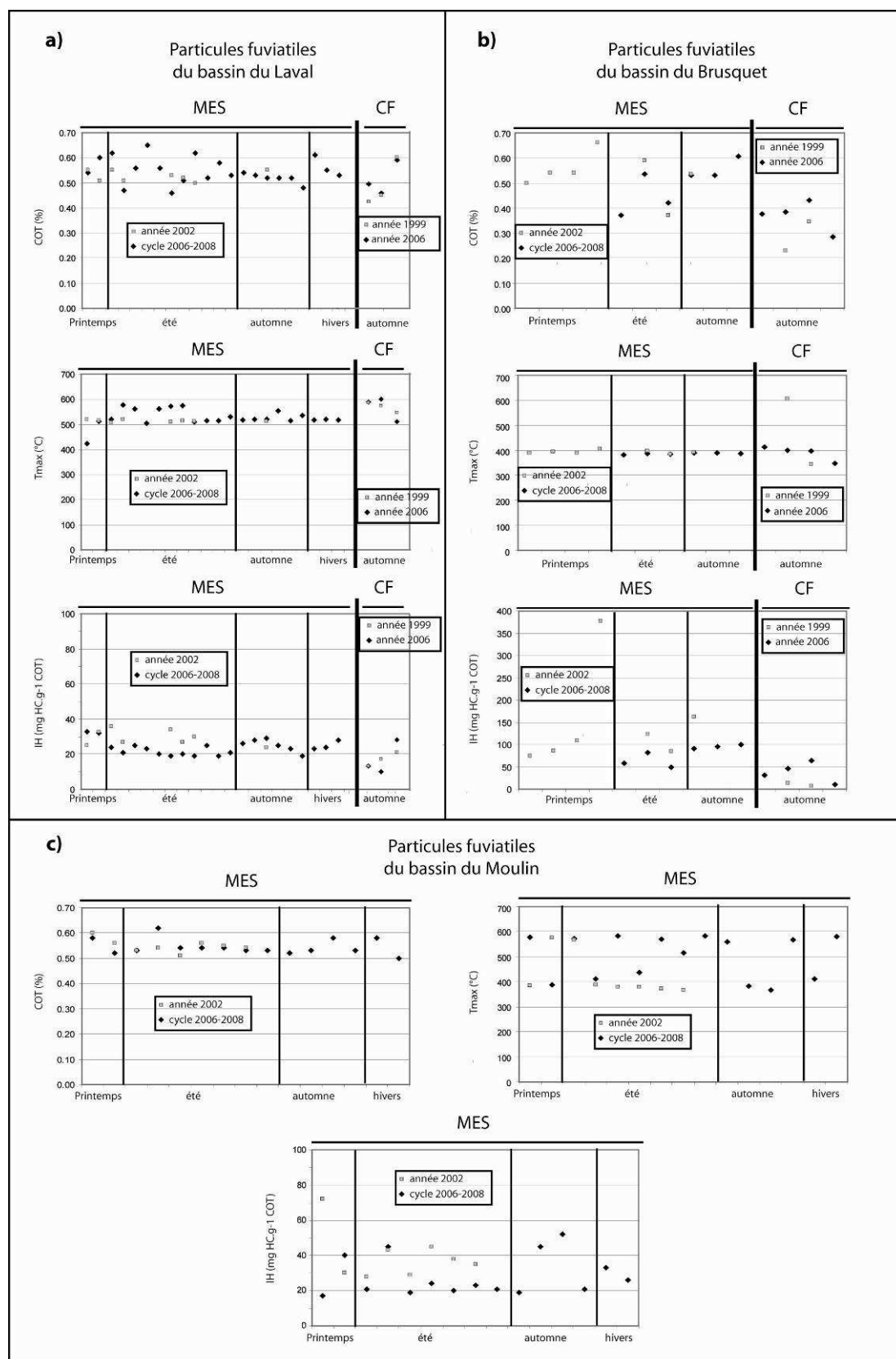


Figure V-4 : Variabilités saisonnières et annuelles des paramètres Rock-Eval des particules fuviales des bassins versants du Laval (a), du Brusquet (b) et du Moulin (c).

A-1-3) Les FmCOF

L'homogénéité du contenu organique fossile des particules fluviales sur les différentes années, saisons et bassins versants nous autorise le calcul des flux de COF libéré par l'altération mécanique des roches (FmCOF) sur deux décennies. Ces flux, rapportés aux surfaces totales des bassins (terrain nu + terrain végétalisé) et exprimés en t/ha/an, sont obtenus de la façon suivante :

eq 2)

$$\text{FmCOF (t/ha/an)} = \text{flux d'exports solides (rapportés à la totalité du bassin)} \times \text{COTf (0,5\%)}$$

Les résultats sont présentés dans la figure V-5.

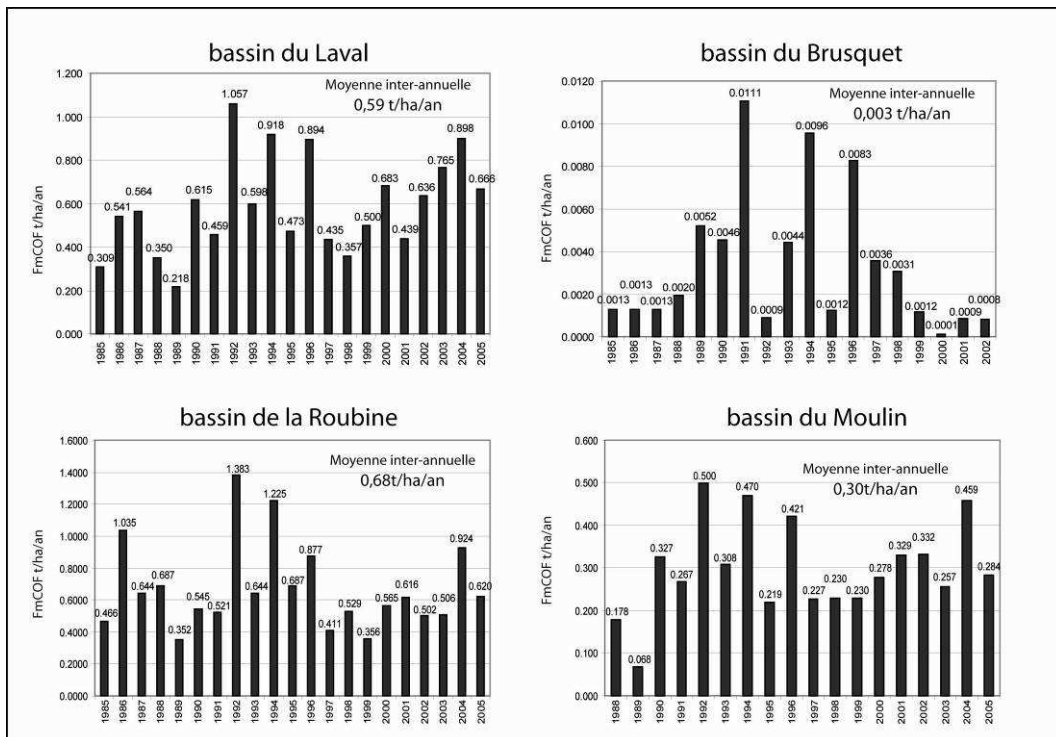


Figure V-5: Chroniques des FmCOF (t/ha/an) des bassins versants expérimentaux de Draix.

Nous remarquons que ces flux sont extrêmement variables d'une année sur l'autre, mais aussi d'un bassin à l'autre. Ils évoluent entre 0,352 et 1,383 t/ha/an pour le bassin de la Roubine, entre 0,218 et 1,057 t/ha/an pour le Laval, entre 0,068 et 0,500 t/ha/an pour le bassin du Moulin, et entre 0,0001 et 0,0111 t/ha/an pour le bassin du Brusquet. Les moyennes interannuelles respectives sont de 0,68, 0,59, 0,30 et 0,003 t/ha/an.

A-2) Les flux de COF libéré par l'altération chimique

Le calcul des flux de COF libéré par l'altération chimique des roches (FeCOF) nécessite la connaissance de la masse annuelle de roche altérée pour chaque bassin versant.

Un moyen d'obtenir cette donnée est l'étude des exports dissous. En effet, pour chaque élément dissous, et pour chaque bassin versant, il est possible de calculer la quantité annuelle issue de l'altération des roches en comparant les flux estimés à l'exutoire avec ceux issus des eaux de pluies.

A-2-1) Masses annuelles de roche altérée

Cras (2005) a effectué un suivi complet des flux de matériel dissous exportés des bassins versants du Laval, du Moulin, et de la Roubine durant l'année 2002 (tableau V-2).

	n*	unité	Q _{spe} l/s/ha	pH -	c25°C μS/cm	Ca mmol/l	Mg ld.	Na ld.	Cl ld.	HCO ₃ ld.	SO ₄ ld.	TDS ld.
Roubine	298	μ	7,4	7,8	918	2,3	2,7	0,8	0,03	1,2	4,7	11,7
		σ	14,5	0,2	486	1,2	1,8	0,6	0,03	0,4	3,2	-
Moulin	208	μ	4,2	7,9	887	2,4	2,2	1,1	0,03	2,1	3,9	11,7
		σ	5,8	0,1	340	0,9	1,0	0,7	0,03	0,8	2,0	-
Laval	163	μ	5,7	7,9	1030	2,5	2,6	1,7	0,11	1,7	4,8	13,4
		σ	5,2	0,1	452	1,0	1,3	1,4	0,16	0,5	2,7	-
Pluie	10	μ	-	-	<20	-	-	-	0,008	-	0,011	-

Tableau V-2 : Moyennes (μ) et écart-types (σ) du matériel dissous des eaux des bassins de la Roubine, du Moulin, du Laval, et de pluies (Cras, 2005).

**n : nombre de données pour le calcul des valeurs de moyenne d'écart type.*

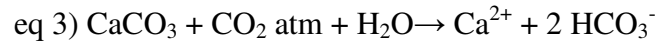
A partir de ces données, et des relations concentration/débit obtenues pour chaque bassin versant, ce même auteur extrapole les flux de solutés dissous aux données de débits enregistrées depuis 1984. Ces flux sont présentés dans le tableau V-3.

Année	P (mm/an)	Laval				Moulin				Roubine					
		Minf	M (t/ha/an)	Msup	n°	lacunes	Minf	M (t/ha/an)	Msup	n°	lacunes	Minf	M (t/ha/an)	Msup	n°
1984	936														
1985	762	1,9	2,4	3,0	406							1,2	2,2	3,2	324
1986	806	1,4	1,9	2,4	584							0,9	1,5	2,2	212
1987	943	2,0	2,6	3,3	1052							0,9	1,6	2,4	249
1988	774	2,2	2,9	3,6	860							0,6	1,1	1,7	309
1989	593	0,4	0,6	0,7	551	lacunes	0,8	1,1	1,4	429	lacunes	0,8	1,3	2,0	391
1990	878	1,8	2,3	2,9	1761		1,1	1,5	2,0	437		0,6	0,9	1,4	574
1991	877	1,4	1,9	2,3	1536			incomplet				0,9	1,4	2,2	1184
1992	1154	3,2	4,2	5,1	3068		1,4	2,0	2,7	1535		0,7	1,2	2,0	694
1993	956	1,1	1,5	1,9	1036	lacunes	3,7	5,4	6,9	2470		0,6	1,1	1,7	1115
1994	1209	2,3	3,2	3,9	2603		2,0	3,0	3,8	1899		0,6	1,0	1,6	714
1995	1115	2,8	3,6	4,4	1840		1,7	2,7	3,6	2010		1,6	2,7	4,1	979
1996	1222	1,7	2,2	2,8	2297		2,6	3,4	4,3	644		0,7	1,2	1,8	922
1997	846	2,9	3,8	4,3	2528		3,2	4,5	5,9	2021		1,3	2,2	3,5	871
1998	767	1,8	2,4	3,0	6864		1,3	1,9	2,4	1347		1,1	1,7	2,7	824
1999	1026	2,8	3,6	4,4	6427		4,0	6,0	7,4	2557		0,6	1,0	1,4	682
2000	1528	4,0	5,3	6,3	7050		5,7	8,2	10,1	2983		0,6	1,0	1,7	979
2001	851	2,5	3,3	3,9	4237		4,9	7,2	9,1	3367		1,6	2,7	4,0	1491
2002	1024	2,5	3,4	4,0	19560		5,1	7,3	9,1	3639		1,4	2,1	3,2	1315
							8,3	10,7	13,5	1633		0,9	1,6	2,5	4191
moyenne	961,3	2,2	2,8	3,5			3,3	4,6	5,9			0,9	1,6	2,4	
max	1528,2	4,0	5,3	6,3			8,3	10,7	13,5			1,6	2,7	4,1	
min	592,9	0,4	0,6	0,7			0,8	1,1	1,4			0,6	0,9	1,4	
σ	247,6	1,0	1,3	1,5			2,4	3,2	3,9			0,4	0,6	0,9	

Tableau V-3 : Masses dissoutes exportées par bassin sur la période 1984 - 2002 avec les limites inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70% (Cras, 2005).

*n : nombre de données disponibles utilisées dans le calcul de la masse exportée.

De ces résultats, nous retiendrons surtout le fait que les teneurs en Ca^{2+} sont nulles dans les eaux de pluies. Nous pouvons donc considérer que l'ensemble du flux de calcium mesuré aux exutoires est issu de la dissolution de la calcite contenue dans les roches des bassins versants. Cette dissolution est illustrée par l'équation suivante :



Sur cette base, le calcul de la masse de roche altérée (t/ha/an) est possible à travers trois étapes.

$$1) \text{ Flux annuel de } \text{Ca}^{2+} \text{ (t/ha/an)} = M \times P_c \quad (\text{eq 4})$$

Où M est la masse annuelle dissoute exportée pour bassin versant et P_c le % en Ca^{2+} au sein du matériel dissous dans les eaux (18,7 , 20,5 et 19,7 % pour les bassins du Laval, du Moulin et de la Roubine).

$$2) \text{ Masse annuelle de } \text{CaCO}_3 \text{ dissoute (t/ha/an)} = \text{Flux annuel de } \text{Ca}^{2+} \times 2,5^{79} \quad (\text{eq 5})$$

$$3) \text{ Masse annuelle de roche altérée (t/ha/an)} = \text{Masse annuelle de } \text{CaCO}_3 \times (100 / T_c) \quad (\text{eq 6})$$

Où T_c est la teneur en CaCO_3 de la roche. Dans notre cas, nous utilisons la valeur moyenne de 35% obtenue à partir des $\text{CaO}\%$ (analyses ICP)⁸⁰.

Les masses annuelles de roche altérée ainsi calculées atteignent, en moyenne, 3,8 , 6,8 et 2,1 t/ha/an pour les bassins du Laval, du Moulin et de la Roubine. Il est cependant nécessaire d'insister sur le fait que les valeurs présentées ne sont que des approximations⁸¹.

⁷⁹ 2,5 correspond au rapport masse molaire de Ca^{2+} sur masse molaire de CaCO_3 (100 / 40).

⁸⁰ Les teneurs en calcite des roches sont obtenues en multipliant par 1,8 les teneurs en CaO , (1,8 est le rapport masse molaire de CaCO_3 sur masse molaire de CaO = 100 / 56). Nous rappelons que les teneurs en CaO des roches évoluent entre 14 et 27%, pour une moyenne de 20% environ (cf. § III-C-4).

⁸¹ Les calculs ne prennent pas en compte le phénomène de stockage/déstockage de matériel à travers les mécanismes de précipitation /dissolution d'évaporites. Celles-ci sont pourtant observées sur le terrain.

A-2-2) Les FcCOF

Considérant le COT moyen des roches (0,5%) et la masse annuelle de roche altérée, nous pouvons calculer les FcCOF (t/ha/an) de la façon suivante :

eq7)

$$\text{FcCOF (t/ha/an)} = \text{Masse annuelle de roche altérée (t/ha/an)} \times \text{COT moyen des roches (0,5\%)}$$

Les résultats sont présentés dans la figure V-6.

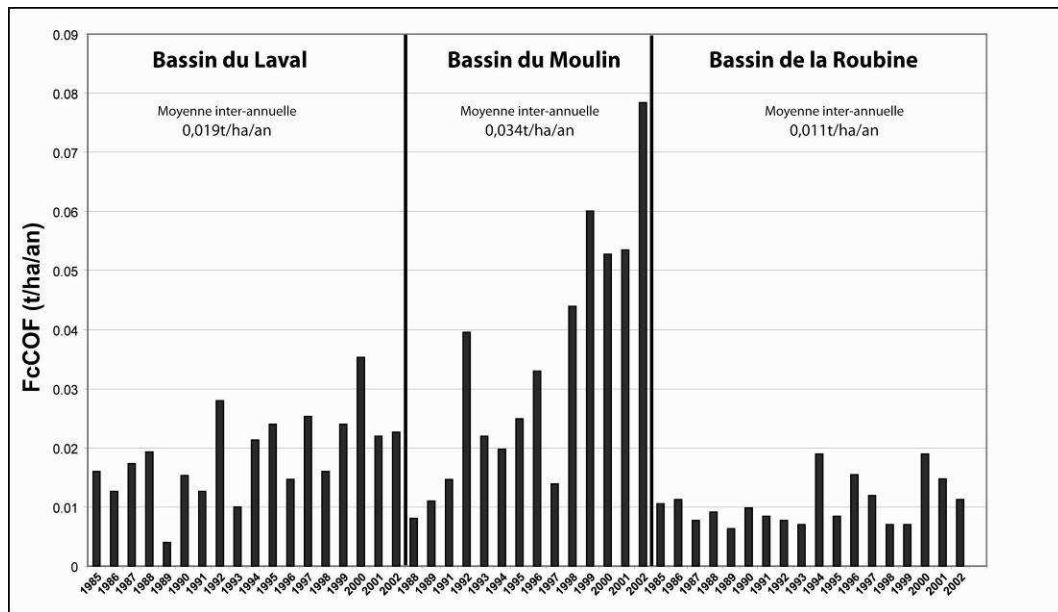


Figure V-6 : Chroniques des FcCOF (t/ha/an) des bassins versants du Laval, du Moulin et de la Roubine.

Ces flux sont extrêmement variables d'une année sur l'autre, mais aussi d'un bassin à l'autre. Ils évoluent entre 0,004 et 0,022 t/ha/an pour le Laval, entre 0,008 et 0,78 t/ha/an pour le Moulin, et entre 0,006 et 0,018 t/ha/an pour la Roubine. Les moyennes interannuelles atteignent respectivement 0,019 , 0,034 et 0,011 t/ha/an.

A-3) Confrontation entre flux et facteurs contrôlant

A-3-1) Les facteurs contrôlant

Les flux de COF libéré par les différentes altérations sont la conséquence de mécanismes complexes dépendants à la fois de critères météorologiques et géomorphologiques.

Si les influences respectives de ces phénomènes sont encore discutées, nous retiendrons que les flux de matériel solide et dissous (et en conséquence les FmCOF et FcCOF) sont notamment dépendants des combinaisons existant entre les différents processus tel que l'altération des roches, la mobilité du matériel érodé (dans le cas de l'altération mécanique des roches), ou encore les comportements hydrologiques des bassins versants (Cras, 2005 ; Mathys, 2006).

De part leur forte interactivité, les facteurs contrôlant les flux sont difficiles à décrire de façon individuelle : nous les exposerons donc de façon exhaustive en les classant selon quatre catégories :

- 1) le facteur climatique détermine, entre autre, le volume des apports d'eau, l'énergie des précipitations⁸², et leur variabilité spatio-temporelle. Il influence aussi la durée et l'intensité des cycles gel / dégel⁸³ ;
- 2) l'état hydrologique initial des bassins versants, dû aux successions antérieures de périodes sèches ou humides, conditionne la réponse de ces derniers lors d'événements météorologiques ;
- 3) la nature des formations superficielles favorise le ruissellement et / ou l'infiltration des eaux de pluie. La présence de sols et de végétation influence aussi grandement les flux de matériel solide, en limitant l'altération mécanique, mais aussi en retenant (barrières végétales) le matériel érodé plus en amont (Crosaz, 1995 ; Rey, 2002a, 2003) ;

⁸² L'impact des gouttes de pluie (ou de la grêle) sur les roches peut provoquer une altération mécanique de ces dernières (Mathys, 2006).

⁸³ Les processus majoritairement responsables de l'altération des formations marneuses de Draix sont la cryoclastie (effet mécanique de l'alternance gel/dégel), l'haloclastie (effet mécanique de la cristallisation des sels dissous), la thermoclastie (effets des modifications de température) et l'hydroclastie (effets des gonflements et rétractions lors des alternances humectation-dessiccation), (Mathys, 2006).

-4) Les caractéristiques géomorphologiques des bassins versants (taille, topographie et morphologie) ont un impact complexe sur les flux. Elles conditionnent, entre autre, la mobilité du matériel érodé à travers des phénomènes de stockage/déstockage de matériel au sein des bassins.

A-3-2) Facteurs simples retenus

La complexité des facteurs contrôlant, et leurs interactions, induisent une certaine difficulté dans l'étude des flux de COF et dans leurs modélisations. En effet les mécanismes prévalants ne sont pas forcément les mêmes aux échelles de la parcelle (m^2), de la ravine, ou du bassin versant. De même, la nature et l'intensité des flux évoluent selon les saisons, voire selon les années (Mathys, 2006). Il se pose, en conséquence, des problèmes d'échelles d'espaces, mais aussi de temps.

Le but de ce travail portant sur le rôle du COF libéré par l'altération des roches dans le cycle du carbone, il nous est nécessaire de tester ces flux sur des échelles spatiales et temporelles différentes. Ceci passe par des modélisations des FmCOF et FcCOF, qui, en raison des applications envisagées, doivent reposer sur des facteurs simples et faciles d'acquisition.

Nous retiendrons les suivants :

- Les taux de végétalisation et les pentes moyennes. Ces facteurs ont déjà été présentés en partie II-A-3. Nous les rappelons dans le tableau suivant (V-4).

Bassins versants	Taux de terrain végétalisé (%)	Pente moyenne (%)
Laval	32	58
Brusquet	87	53
Roubine	21	75
Moulin	46	30

Tableau V-4 : Taux de végétalisation et pentes moyennes des bassins étudiés.

- Les précipitations annuelles moyennes. Nous les avons calculées pour chaque bassin à partir des précipitations mesurées par les cinq pluviographes situés dans la zone d'étude (Pompe, Laval, Seigné, Blache et Pépinière ; figure V-7 a et b). Afin de tenir compte des variations

de précipitations au sein des bassins (zones amont ou aval), nous avons, lorsque cela était possible, moyenné les mesures des pluviographes de la Pompe et du Laval pour le bassin du Laval, de la Pépinière et de la Blache pour le bassin du Brusquet ; et de la Pompe, du Laval et de Sévigné pour le bassin du Moulin. Les précipitations retenues pour le bassin de la Roubine sont issues des mesures obtenues grâce au pluviographe du Laval seul. Les résultats sont présentés dans la figure V-7 c.

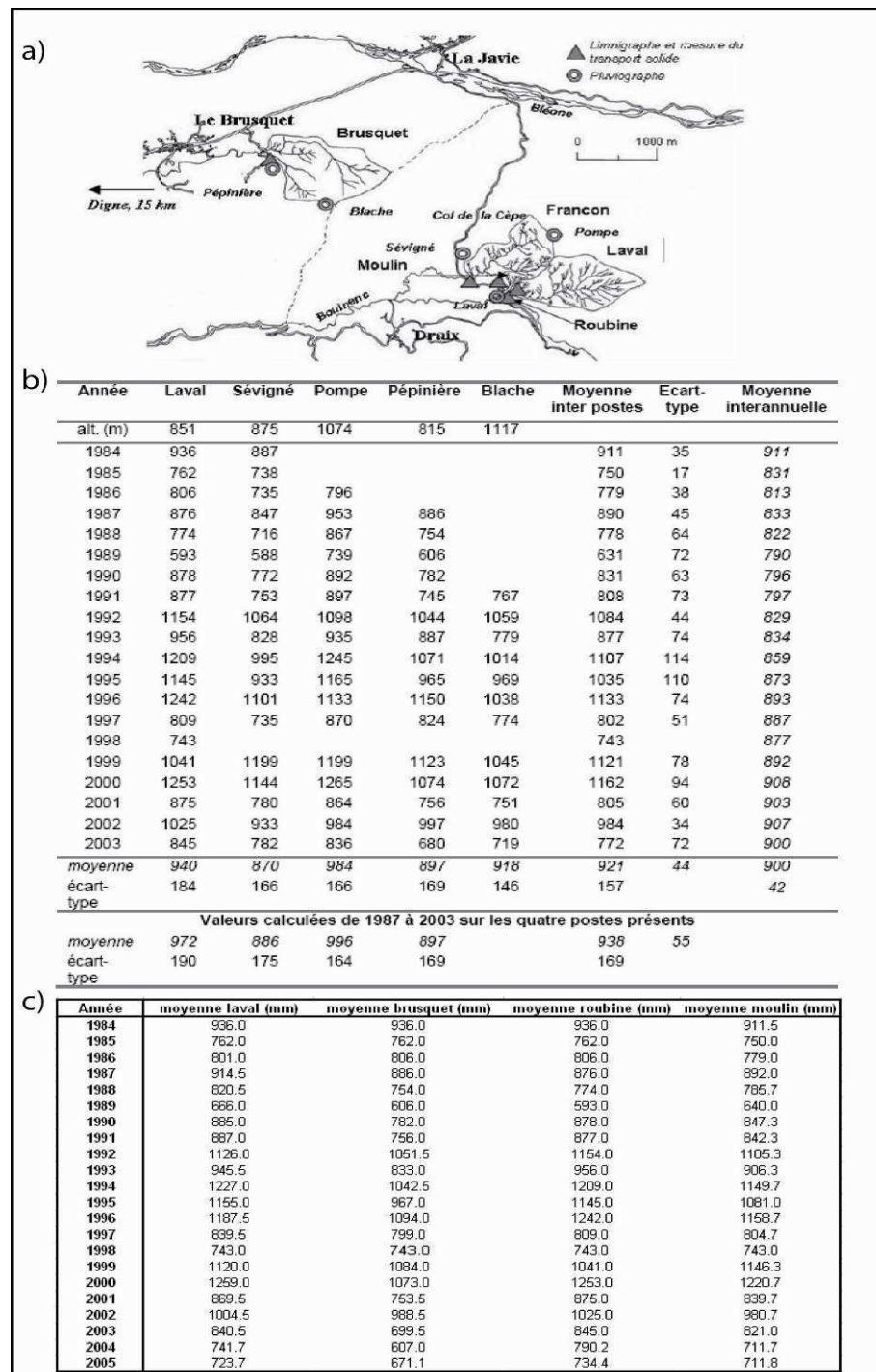


Figure V-7: Les précipitations annuelles moyennes des bassins versants de Draix
a) positionnement des pluviographes (Mathys, 2006) ;
b) précipitations annuelles (mm) mesurées par les pluviographes (Mathys, 2006) ;
c) moyennes des précipitations annuelles à l'échelle des bassins étudiés (ce travail).

A-3-3) Influence des facteurs sur les FmCOF

Les facteurs retenus sont d'ordre géomorphologiques (taux de terrain nu noté Tn en % et pente moyenne notée Pt en %) et climatiques (précipitations annuelles moyennes notées Pre en mm). Nous présentons leurs impacts possibles sur les flux de COF calculés.

A-3-3-1) Influence des facteurs géomorphologiques (Tn et Pt)

Sur les FmCOF : Nous observons une excellente corrélation entre le facteur Tn et les FmCOF (Figure V-8 a) avec un quasi alignement des valeurs de FmCOF (moyennes inter-annuelles) des bassins du Brusquet, du Laval, et de la Roubine. Seule la valeur de FmCOF du bassin du Moulin s'écarte quelque peu avec un FmCOF comparativement plus faible (0,30 t/ha/an) pour un Tn de 54%⁸⁴.

Nous observons, aussi, une bonne corrélation entre le facteur Pt et les FmCOF moyens (Figure V-8 b) pour les bassins du Moulin, du Laval et de la Roubine. La valeur de FmCOF obtenue sur le bassin du Brusquet est par contre totalement excentrée (0,30 t/ha/an) pour une pente moyenne de 53 %⁸⁵. Ces relations montrent que les facteurs Tn et Pt favorisent le ruissellement et impactent directement les FmCOF.

Sur les FcCOF : Nous observons une corrélation significative (négative) entre les facteurs Tn, Pt et les FcCOF moyens (Figure V-8 b) pour les bassins du Moulin, du Laval et de la Roubine⁸⁶. Cette relation inverse entre les facteurs et les flux met en avant le rôle de l'infiltration sur l'érosion chimique.

- Sur les rapports FmCOF / FcCOF : Les rapports FmCOF / FcCOF ont été calculés et comparés aux facteurs Tn et Pt (tableau V-5 et figure V-9). La relation, positive, entre ces rapports et les facteurs retenus peuvent exprimer la dépendance étroite liant les partitions FmCOF / FcCOF et ruissellement / infiltration.

⁸⁴ Cette valeur faible peut être mise en relation avec la faible pente moyenne de ce bassin (30%).

⁸⁵ Cette valeur faible obtenue pour le bassin du Brusquet peut être interprétée comme la conséquence du très fort couvert végétal (87%) limitant le ruissellement.

⁸⁶ Le FcCOF moyen du bassin du Moulin est comparativement plus fort (par rapport aux facteurs Tn et Pt) que ceux du Laval et de la Roubine. Nous rappelons que ce bassin possède la plus faible pente, et le plus faible taux de terrain nu (30 et 54%).

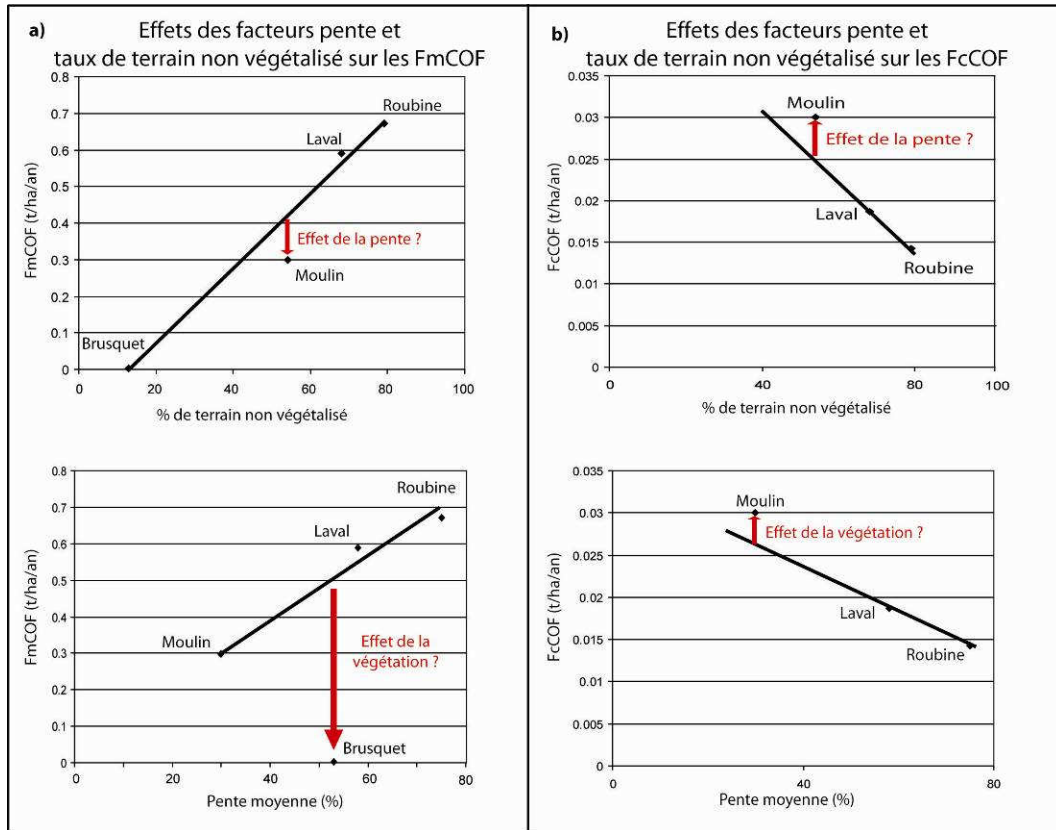


Figure V-8 : Effets des facteurs pente et taux de terrain non végétalisé sur les FmCOF (a) et sur les FcCOF (b).

Bassin versant	FmCOF moyen (t/ha/an)	FcCOF moyen (t/ha/an)	FmCOF / FcCOF
Laval	0.59	0.019	31.05
Moulin	0.3	0.034	8.82
Roubine	0.68	0.011	61.82
Brusquet	0.003	nd	nd

Tableau V-5 : FmCOF moyens, FcCOF moyens et rapports FmCOF / FcCOF des bassins versants étudiés (nd = non déterminé).

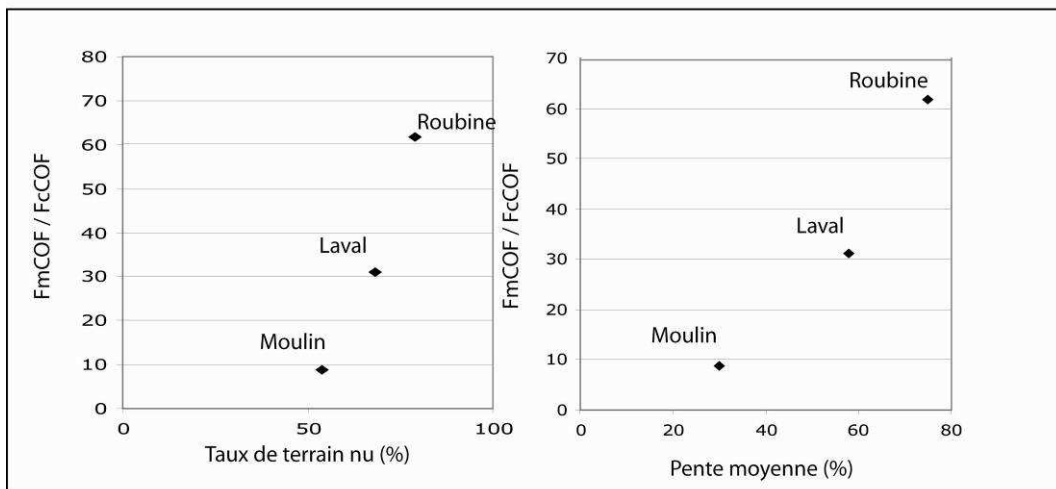


Figure V-9 : Corrélations entre les rapports FmCOF / FcCOF moyens et les facteurs taux de terrain non végétalisé et pente.

A-3-3-2) Influence des facteurs climatiques (Pre)

- **Sur les *FmCOF* et *FcCOF*** : La comparaison a été faite bassin par bassin. Il semble, qu'en dépit d'une certaine dispersion des points, les *FmCOF* et *FcCOF* augmentent avec les précipitations⁸⁷ (Figure V-10 et 11).

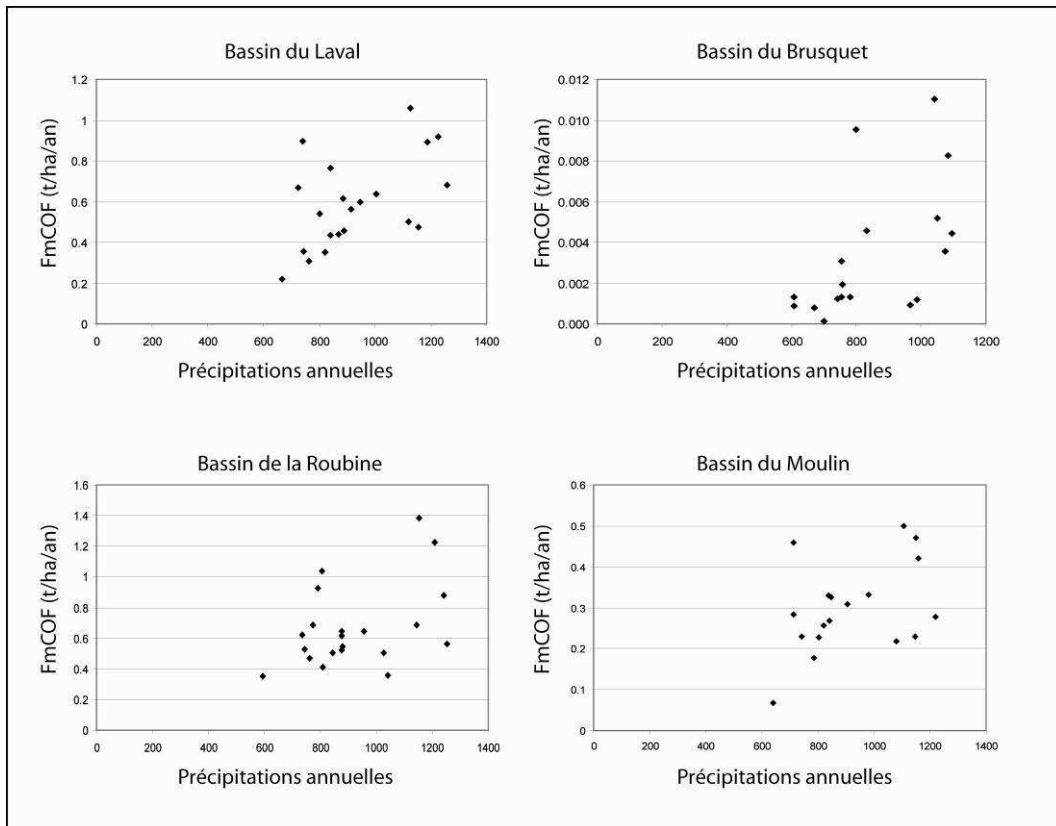


Figure V-10: Corrélations entre les *FmCOF* annuels et les précipitations annuelles pour les bassins versants de Draix.

⁸⁷ Cette dispersion peut s'expliquer par les différents mécanismes et interactions occurrents à échelles plus fines (parcelles ou ravines) décrits dans la partie V-B-1-1.

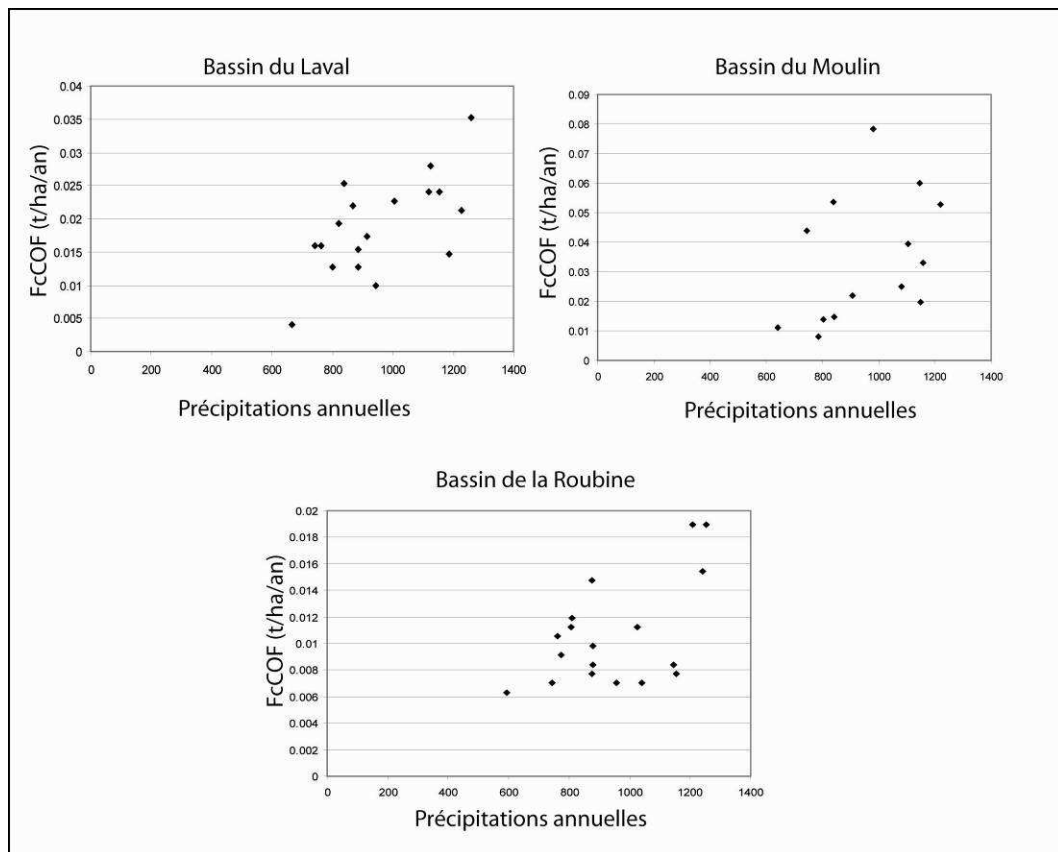


Figure V-11: Corrélations entre les FcCOF annuels et les précipitations annuelles pour les bassins versants de Draix.

A-4) Conclusion

Les résultats obtenus dans cette partie nous permettent de conclure sur trois points :

- 1) Les flux de COF libéré par les altérations mécanique et chimique, exprimés en t/ha/an, apparaissent de fait comme étant des quantités « non négligeables ». Ils doivent donc être pris en compte lors de l'établissement de flux de Corg dans les cours d'eau.
- 2) Nous notons pour l'ensemble des bassins étudiés une très forte prépondérance des FmCOF par rapport aux FcCOF. Les rapports FmCOF sur FcCOF varient en effet de 8,82 (bassin du Moulin) à 61,82 (bassin de la Roubine) (tableau V-5) témoignant de l'importance de l'érosion mécanique en contexte de « badlands ».
- 3) Ces flux témoignent, au sein d'un même bassin, d'une grande variabilité d'une année à l'autre pouvant être mise en corrélation avec la quantité de précipitation. Ils varient aussi d'un bassin à un autre, mettant en avant les rôles respectifs des facteurs géomorphologiques (taux de terrain nu et pentes) sur la partition ruissellement / infiltration. .

B) Modélisations des flux de COF

B-1) Stratégie de modélisation

Une modélisation des flux solides et liquides existe déjà pour les bassins de Draix (Mathys, 2003). Celle-ci, basée sur l'événement, intègre et simule l'ensemble des processus intervenant depuis la pluie jusqu'aux débits liquides et solides mesurés à l'exutoire. La représentation des phénomènes érosifs et hydrologiques est basée sur une arborescence de versants et de lits⁸⁸.

Malgré ses qualités, cette modélisation ne correspond pas à nos besoins car : - 1) elle est événementielle ; - 2) elle nécessite une connaissance élevée du site étudié.

Notre approche est différente et nous proposons une modélisation empirique annuelle des FmCOF et FcCOF, basée sur une description simple des bassins selon les facteurs que nous avons déjà présentés : - 1) taux de terrain non végétalisé (Tn en %), - 2) pente moyenne (Pt en %), et - 3) précipitations annuelles (Pre en mm). Nous espérons ainsi nous affranchir des problèmes suscités à travers un nivèlement des variations existantes aux échelles spatiales et temporelles plus fines.

B-2) Modélisations des FmCOF

B-2-1) Modélisations des FmCOF selon les facteurs Tn, Pt et Pre

La modélisation des FmCOF peut se faire selon deux approches différentes : - 1) à travers une régression linéaire multiple ; ou -2) en discriminant les flux sur terrain non végétalisé (FmCOFn) des flux sur terrain végétalisé (FmCOFv)⁸⁹. Les données initiales sont présentées dans le tableau V-6.

⁸⁸ Le bassin est représenté comme un assemblage de versants et de biefs regroupés en une structure arborescente.

⁸⁹ En effet, les surfaces végétalisées et non végétalisées n'impactent pas de la même manière sur les FmCOF. Les surfaces végétalisées diminuent les flux de FmCOF ; notamment en protégeant les roches face à l'altération mécanique, et en retenant le matériel érodé plus en amont.

bassin versant	Année	Export COF (t/ha/an à partir des flux de matériel solide)	taux de terrain nu (%)	Pente moyenne (%)	Précipitations annuelles moyennes (mm)
Laval	1985	0.31	68	58	762.0
	1986	0.54	68	58	801.0
	1987	0.56	68	58	914.5
	1988	0.35	68	58	820.5
	1989	0.22	68	58	666.0
	1990	0.62	68	58	885.0
	1991	0.46	68	58	887.0
	1992	1.06	68	58	1126.0
	1993	0.60	68	58	945.5
	1994	0.92	68	58	1227.0
	1995	0.47	68	58	1155.0
	1996	0.89	68	58	1187.5
	1997	0.44	68	58	839.5
	1998	0.36	68	58	743.0
	1999	0.50	68	58	1120.0
	2000	0.68	68	58	1259.0
	2001	0.44	68	58	869.5
	2002	0.64	68	58	1004.5
	2003	0.77	68	58	840.5
	2004	0.90	68	58	741.7
	2005	0.67	68	58	723.7
Brusquet	1988	0.0013	13	53	754.0
	1989	0.0013	13	53	606.0
	1990	0.0013	13	53	782.0
	1991	0.0020	13	53	756.0
	1992	0.0052	13	53	1051.5
	1993	0.0046	13	53	833.0
	1994	0.0111	13	53	1042.5
	1995	0.0009	13	53	967.0
	1996	0.0044	13	53	1094.0
	1997	0.0096	13	53	799.0
	1998	0.0012	13	53	743.0
	1999	0.0083	13	53	1084.0
	2000	0.0036	13	53	1073.0
	2001	0.0031	13	53	753.5
	2002	0.0012	13	53	988.5
	2003	0.0001	13	53	699.5
	2004	0.0009	13	53	607.0
	2005	0.0008	13	53	671.1
Roubine	1985	0.47	79	75	762.0
	1986	1.03	79	75	806.0
	1987	0.64	79	75	876.0
	1988	0.69	79	75	774.0
	1989	0.35	79	75	593.0
	1990	0.55	79	75	878.0
	1991	0.52	79	75	877.0
	1992	1.38	79	75	1154.0
	1993	0.64	79	75	956.0
	1994	1.22	79	75	1209.0
	1995	0.69	79	75	1145.0
	1996	0.88	79	75	1242.0
	1997	0.41	79	75	809.0
	1998	0.53	79	75	743.0
	1999	0.36	79	75	1041.0
	2000	0.56	79	75	1253.0
	2001	0.62	79	75	875.0
	2002	0.50	79	75	1025.0
	2003	0.51	79	75	845.0
	2004	0.92	79	75	790.2
	2005	0.62	79	75	734.4
Moulin	1988	0.18	54	30	785.7
	1989	0.07	54	30	640.0
	1990	0.33	54	30	847.3
	1991	0.27	54	30	842.3
	1992	0.50	54	30	1105.3
	1993	0.31	54	30	906.3
	1994	0.47	54	30	1149.7
	1995	0.22	54	30	1081.0
	1996	0.42	54	30	1158.7
	1997	0.23	54	30	804.7
	1998	0.23	54	30	743.0
	1999	0.23	54	30	1146.3
	2000	0.28	54	30	1220.7
	2001	0.33	54	30	839.7
	2002	0.33	54	30	980.7
	2003	0.26	54	30	821.0
	2004	0.46	54	30	711.7
	2005	0.28	54	30	711.8

Tableau V-6 : Données initiales pour la modélisation des FmCOF.

B-2-1-1) Modélisation des FmCOF à partir d'une régression linéaire multiple (notée MmL)

La corrélation entre les FmCOF et les facteurs Tn, Pt et Pre se traduit par la relation suivante :

$$\text{eq 8) FmCOF (t/ha/an)} = 0,888 \times \frac{\text{Tn (\%)}}{100} + 0,345 \times \frac{\text{Pt (\%)}}{100} + 0,00043 \times \text{Pre (mm)} - 0,656$$

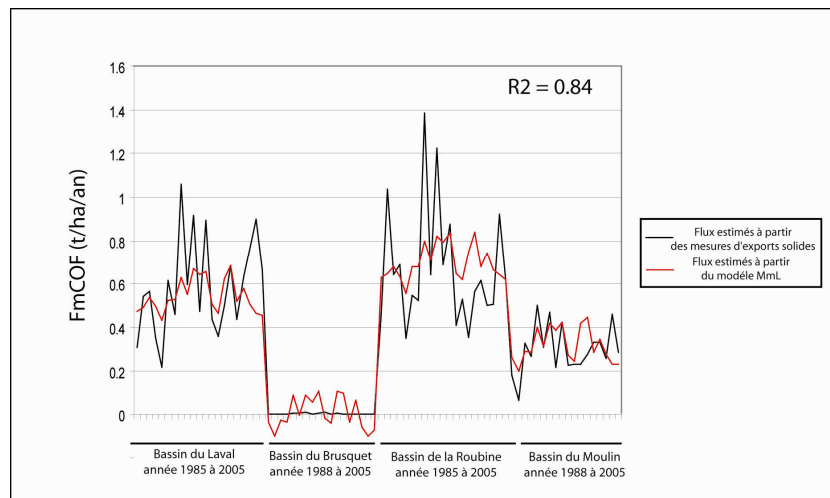


Figure V-12: Corrélation entre les FmCOF issus des mesures d'exports solides et les FmCOF issus de la modélisation MmL.

Le modèle MmL permet l'obtention de FmCOF proches de ceux estimés à partir des mesures de flux solides ($R^2 = 0,84$; figure V-12). Les flux modélisés moyens pour les bassins du Laval, du Brusquet, de la Roubine et du Moulin atteignent 0,54 , 0,005 , 0,70 et 0,32 t/ha/an, et sont directement comparables aux flux estimés de 0,59 , 0,003 , 0,68 et 0,3 t/ha/an⁹⁰.

⁹⁰ La forte dispersion des FmCOF modélisés pour le bassin du Brusquet (variation entre -0,1 et 0,11 t/ha/an) s'explique par le fait que la modélisation MmL moyenne l'effet des précipitations sur l'ensemble des quatre bassins versants. Or, nous vu que cet effet s'applique sur les FmCOF moyens de chaque bassin (cf. § V-A-3-3-2) : ainsi une même variation de Pre peut générer une évolution de FmCOF (en valeur absolue) plus forte sur un bassin à fort export (Laval ou la Roubine) que sur un bassin à faible export (Brusquet).

B-2-1-2) Modélisations des FmCOF en discriminant flux sur terrain non végétalisé (FmCOFn) et flux sur terrain végétalisé (FmCOFv) (notées MmNV)

La mise en évidence de possibilités de rétention de matériel érodé par des barrières végétales (figure V-13) souligne l'impact différentiel des surfaces végétalisées et non végétalisées sur les FmCOF.

Nous proposons donc une modélisation intégrant ce phénomène en distinguant les FmCOF sur terrain nu (FmCOFn) et FmCOFv sur terrain végétalisé (FmCOFv). Celle-ci se fonde sur la relation suivante :

$$\text{eq 9) FmCOF (t/ha/an)} = \text{FmCOFn} \times \frac{\text{Tn (\%)}}{100} + \text{FmCOFv} \times \frac{1 - \text{Tn (\%)}}{100}$$

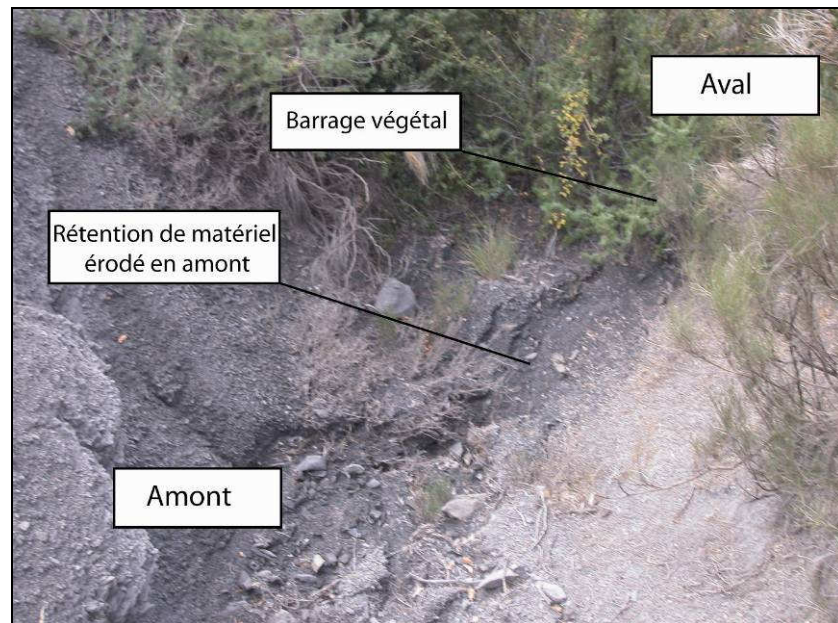


Figure V-13: Barrage végétal et rétention de matériel érodé en amont observé dans le bassin du Brusquet (cliché, Y. Graz).

Deux approches peuvent, dès lors, être envisagées :

Approche 1 : Nous pouvons considérer que les flux sont nuls à précipitation nulle. Les $FmCOFn$ et $FmCOFv$ sont alors calculés de la façon suivante (modélisation notée MmNV1) :

$$\text{eq 10) } FmCOFn \text{ (t/ha/an)} = a \times \frac{Pt (\%)}{100} \times Pre \text{ (mm)}$$

$$\text{eq 11) } FmCOFv \text{ (t/ha/an)} = b \times \frac{Pt (\%)}{100} \times Pre \text{ (mm)}$$

L'équation 9 développée à partir des équations 10 et 11 devient :

$$\text{eq 12) } FmCOF \text{ (t/ha/an)} = (a - b) \times \left(\frac{Tn (\%)}{100} \times \frac{Pt (\%)}{100} \times Pre \text{ (mm)} \right) + b \times \left(\frac{Tn (\%)}{100} \times \frac{Pt (\%)}{100} \right)$$

L'obtention des constantes a et b est autorisée à partir des 78 données de $FmCOF$ des quatre bassins. Le modèle MmNV1 se traduit finalement par la relation suivante :

$$\text{eq 13) } FmCOF \text{ (t/ha/an)} = \left(1,34.10^{-6} \times \frac{Pt (\%)}{100} \times Pre^2 \text{ (mm)} \right) \times \frac{Tn (\%)}{100} - \left(5,9.10^{-8} \times \frac{Pt (\%)}{100} \times Pre^2 \text{ (mm)} \right) \times \left(1 - \frac{Tn (\%)}{100} \right)$$

Approche 2 : Nous pouvons aussi raisonner de manière plus linéaire et calculer les $FmCOFn$ et $FmCOFv$ de la façon suivante (modélisation notée MmNV2) :

$$\text{eq 14) } FmCOFn \text{ (t/ha/an)} = e \times \frac{Pt (\%)}{100} + f \times Pre \text{ (mm)}$$

$$\text{eq 15) } FmCOFv \text{ (t/ha/an)} = g \times \frac{Pt (\%)}{100} + h \times Pre \text{ (mm)}$$

L'équation 9 développée à partir des équations 14 et 15 devient :

$$\text{eq 16) FmCOF (t/ha/an)} = (e - g) \times \left(\frac{\text{Tn}(\%)}{100} \times \frac{\text{Pt}(\%)}{100} \right) + (f - h) \times \left(\frac{\text{Tn}(\%)}{100} \times \text{Pre (mm)} \right) + c \times \frac{\text{Pt}(\%)}{100} + d \times \text{Pre (mm)}$$

L'obtention des constantes e, f, g et h est autorisée à partir des 78 données de FmCOF des quatre bassins. Le modèle MmNV1 se traduit finalement par la relation suivante :

$$\text{eq 17) FmCOF(t/ha/an)} = \left(0,63 \times \frac{\text{Pt}(\%)}{100} + 5,17 \cdot 10^7 \times \text{Pre}^2(\text{mm}) \right) \times \frac{\text{Tn}(\%)}{100} - \left(9,24 \cdot 10^{-3} \times \frac{\text{Pt}(\%)}{100} + 1,12 \cdot 10^{-7} \text{Pre}^2(\text{mm}) \right) \times \left(1 - \frac{\text{Tn}(\%)}{100} \right)$$

Le modèle MmNV1 (figure V-14) permet l'obtention de FmCOF corrects par rapport à ceux estimés à partir des mesures de flux solides ($R^2 = 0,79$). Les FmCOF moyens modélisés sont de 0,56 , 0,049 , 0,70 et 0,18 t/ha/an, pour des estimations atteignant 0,59 , 0,003 , 0,68 et 0,3 t/ha/an (à partir des données de terrains.) Nous notons une sur-estimation des flux pour le bassin du Brusquet, et une sous-estimation pour le bassin de la Roubine.

Nous discriminons par ailleurs les FmCOFn et FmCOFv. Les FmCOFn moyens atteignent les valeurs de 0,70 , 0,53 , 0,86 et 0,35 t/ha/an pour les bassins du Laval, du Brusquet, de la Roubine et du Moulin. Les FmCOFv sont systématiquement négatifs (-0,031 , -0,023 , -0,039 et -0,015 t/ha/an pour le Laval, le Brusquet, la Roubine et le Moulin), témoignant ainsi de la rétention de matériel érodé sur terrain végétalisé (figure V-13).

Le modèle MmNV2 (figure V-15) permet l'obtention de FmCOF très proches de ceux obtenus à partir des flux de matériel solide ($R^2 = 0,85$). Les FmCOF moyens modélisés sont de 0,53 , 0,016 , 0,71 et 0,30 t/ha/an, pour des estimations atteignant 0,59 , 0,003 , 0,68 et 0,30 t/ha/an (à partir des données de terrains).

Ils se traduisent par des FmCOFn et FmCOFv plus importants que ceux modélisés par MmNV1, mais aussi plus homogènes d'un bassin à l'autre. Les FmCOFn moyens sont de 0,83 , 0,72 , 0,93 et 0,64 t/ha/an pour les bassins du Laval, du Brusquet, de la Roubine et du Moulin. Les FmCOFv sont, à nouveau systématiquement négatifs (-0,11 , - 0,09 , -0,011 et - 0,010 t/ha/an pour le Laval, le Brusquet, la Roubine et le Moulin).

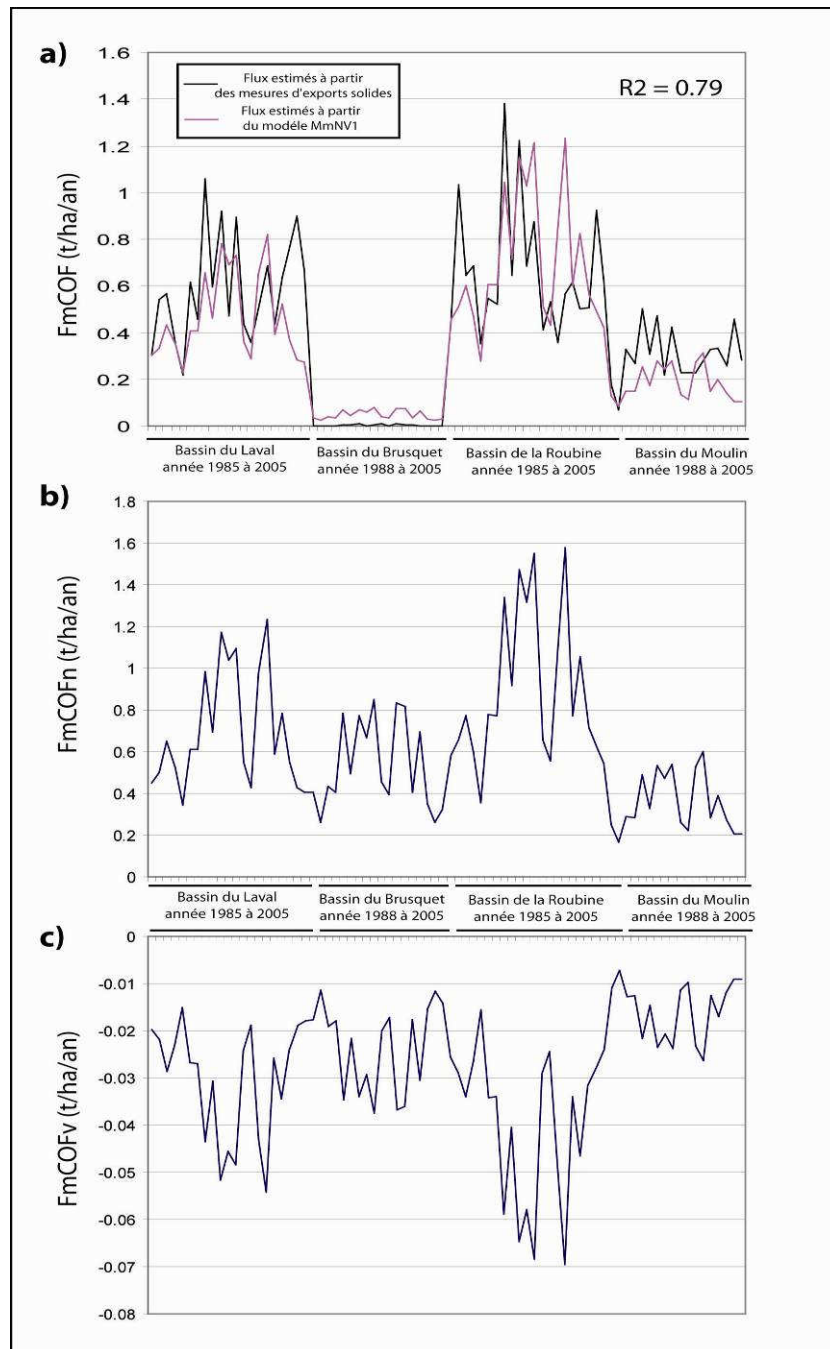


Figure V-14: FmCOF obtenus par la modélisation MmNV1
 a) corrélation entre les FmCOF issus des mesures d'exports solides et les FmCOF issus de la modélisation MmNV
 b) FmCOFn modélisés.
 c) FmCOFv modélisés.

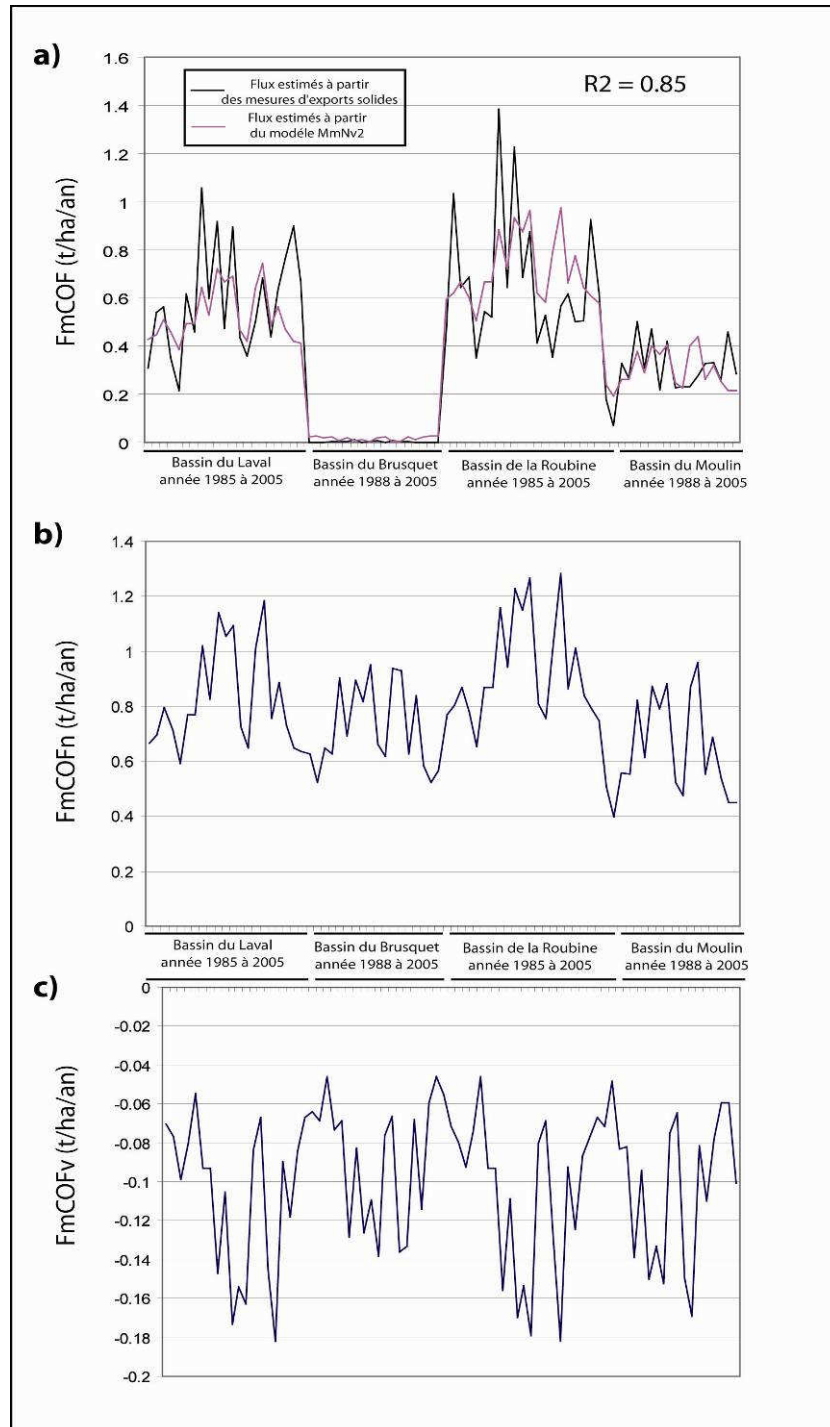


Figure V-15: FmCOF obtenus par la modélisation MmNV2

- a) corrélation entre les FmCOF issus des mesures d'exports solides et les FmCOF issus de la modélisation MmNV2
b) FmCOFn modélisés.
c) FmCOFv modélisés.

B-2-1-3) Conclusion partielle

Parmi les trois modélisations utilisant les facteurs Tn, Pt et Pre, nous retiendrons plus particulièrement la modélisation MmNV2. Cette dernière offre en effet : -1) la meilleure corrélation entre flux modélisés et flux obtenus à partir des données de terrains ($R^2 = 0,85$) ; - 2) la possibilité de calculer des flux sur terrain végétalisé ou non végétalisé ; et -3) une modélisation de FmCOF satisfaisante sur l'ensemble des bassins versants⁹¹.

B-2-2) Modélisations simplifiées des FmCOF

Les modèles précédemment exposés apparaissent efficaces dans la modélisation de FmCOF, mais nécessitent la connaissance des valeurs de l'ensemble des facteurs Tn, Pt et Pre.

L'application de ces modélisations sur d'autres sites d'études peut cependant poser problème à travers l'absence d'un, ou de plusieurs paramètres. Nous devons donc tester la possibilité de modélisations simplifiées de FmCOF à partir de deux, voire un facteur.

B-2-2-1) Modélisations des FmCOF à partir de deux facteurs

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure V-16.

- Modélisation des FmCOF à partir des facteurs Tn et Pt (notée MmTnPt): La corrélation entre les FmCOF et les facteurs Tn et Pt se traduit par la relation suivante :

$$\text{eq 18) FmCOF (t/ha/an)} = 0,946 \times \frac{\text{Tn (\%)}}{100} + 0,321 \times \frac{\text{Pt (\%)}}{100} - 0,288$$

Ce modèle permet l'obtention de FmCOF moyens proches des moyennes interannuelles estimées à partir des mesures de flux solides ($R^2 = 0,81$). Pour les bassins du Laval, du Brusquet, de la Roubine et du Moulin, les flux modélisés sont de 0,54 , 0,005 , 0,70 et 0,32 t/ha/an, pour des estimations de 0,59 0,003 , 0,68 et 0,3 t/ha/an à partir des données de terrains. Cette modélisation ne permet pas, par contre, la prise en compte des variations annuelles.

⁹¹ La modélisation MNV1 sur-estime les FmCOF du Brusquet et sous-estime ceux du Moulin.

- Modélisation des FmCOF à partir des facteurs Tn et Pre (notée MmTnPre): La corrélation entre les FmCOF et les facteurs Tn et Pre se traduit par la relation suivante :

$$\text{eq 19) FmCOF (t/ha/an)} = 0,984 \times \frac{\text{Tn (\%)}}{100} + 0,0004 \times \text{Pre (mm)} - 0,507$$

Ce modèle permet de prendre en compte les variations annuelles de flux issues des fluctuations du facteur Pre : les flux obtenus apparaissent mieux corrélés ($R^2 = 0,83$). Pour les bassins du Laval, du Brusquet, de la Roubine et du Moulin, les FmCOF moyens modélisés sont de 0,5 , -0,028 , 0,65 et 0,40 t/ha/an, pour des estimations de 0,59 , 0,003 , 0,68 et 0,3 t/ha/an à partir des données de terrains.

Nous remarquons cependant que le FmCOF moyen modélisé pour le bassin du Moulin (0,4 t/ha/an) est surestimé par rapport à celui obtenu grâce des données de terrain (0,3 t/ha/an). Ceci peut s'expliquer simplement : le modèle MmTnPne ne prend pas en compte le facteur pente (Pt) alors que ce bassin diffère des autres par une pente particulièrement faible (30 %).

- Modélisation des FmCOF à partir des facteurs Pt et Pre (notée MmPtPre): La corrélation entre les FmCOF et les facteurs Tn et Pre se traduit par la relation suivante :

$$\text{eq 20) FmCOF (t/ha/an)} = 0,913 \times \frac{\text{Pt (\%)}}{100} + 0,0006 \times \text{Pre (mm)} - 0,651$$

Ce modèle permet l'obtention de FmCOF nettement moins bien corrélés avec les flux estimés ($R^2 = 0,58$). Nous notons notamment une très forte surestimation pour le bassin du Brusquet (FmCOF modélisé de 0,36 pour un FmCOF estimé de 0,003 t/ha/an).

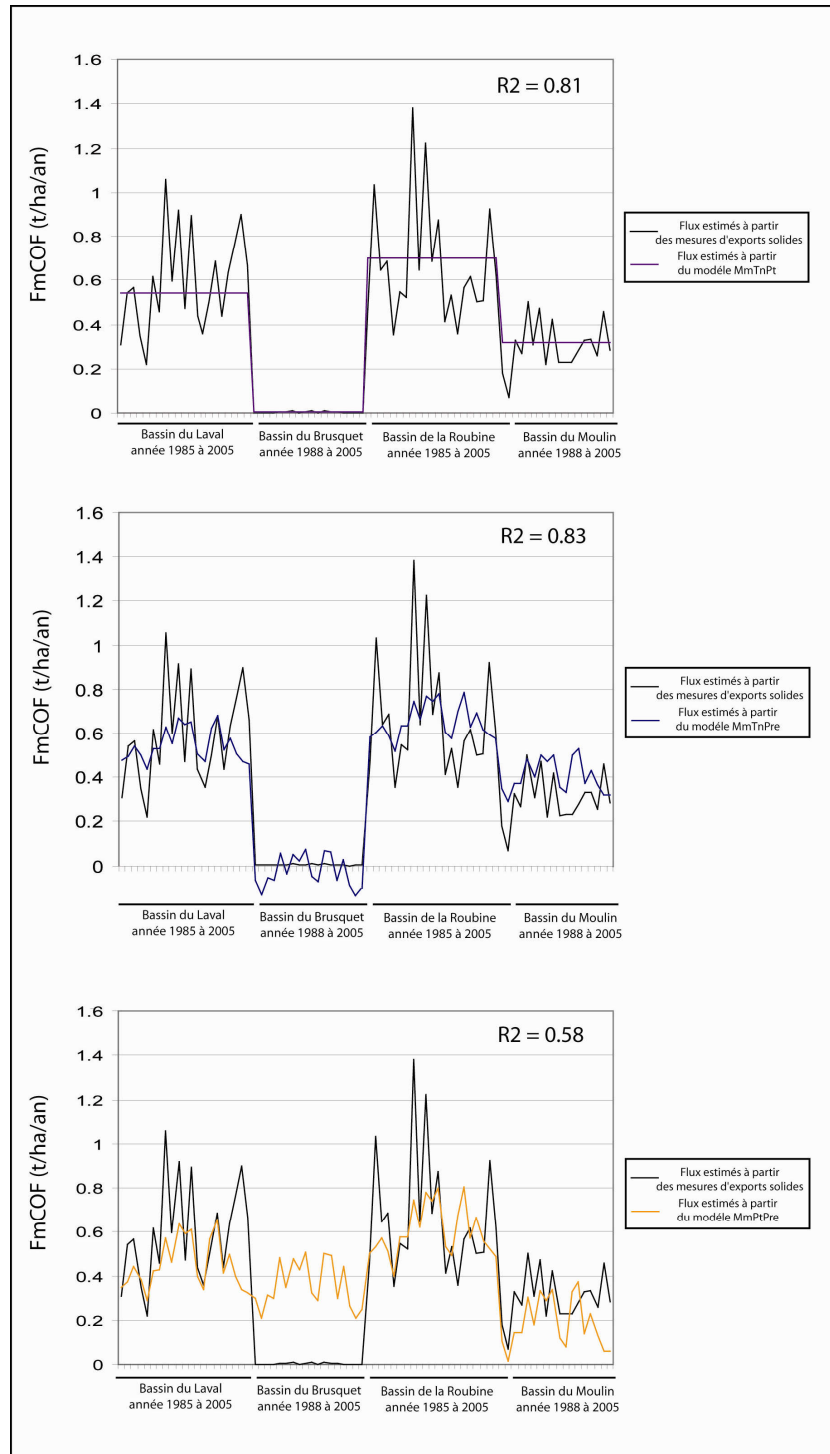


Figure V-16: Corrélations entre les FmCOF issus des mesures d'exports solides et les FmCOF issus des modélisations MmTnPt, MmTnPre et MmPtPre.

B-2-2-2) Modélisations des FmCOF à partir d'un facteur unique

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure V-17.

- Modélisation des FmCOF à partir du facteur Tn (Notée MmTn): La corrélation entre les FmCOF et le facteur Tn se traduit par la relation suivante :

$$\text{eq 21) FmCOF (t/ha/an)} = 1,033 \times \frac{\text{Tn (\%)}}{100} - 0,16$$

Ce modèle permet l'obtention de FmCOF moyens proches des moyennes interannuelles estimées à partir des mesures de flux solides ($R^2 = 0,80$). Ces flux modélisés sont de 0,54 , -0,025 , 0,66 et 0,40 t/ha/an pour les bassins du Laval, du Brusquet, de la Roubine et du Moulin pour 0,59 , 0,003 , 0,68 et 0,3 t/ha/an estimés. Nous notons cependant deux points particuliers :

- 1) Le FmCOF négatif modélisé pour le bassin versant du Brusquet montre qu'en dessous de la valeur de Tn de 16%, le modèle ne fonctionne plus⁹². Il nous faut alors considérer le bassin comme éteint (ce qui est à peu près le cas du Brusquet avec un FmCOF moyen estimé de 0,003 t/ha/an seulement).
- 2) Le FmCOF moyen modélisé pour le bassin du Moulin (0,4 t/ha/an) est surestimé par rapport à celui obtenu grâce des données de terrain (0,3 t/ha/an). Nous avons déjà observé et expliqué ce phénomène (cf. modélisation MmTnPre, § B-2-1-1)

- Modélisation des FmCOF à partir du facteur Pt (notée MmPt): La corrélation entre les FmCOF et le facteur Pt se traduit par la relation suivante :

$$\text{eq 22) FmCOF (t/ha/an)} = 0,93 \times \frac{\text{Pt (\%)}}{100} - 0,103$$

⁹² Les valeurs modélisées deviennent négatives.

Ce modèle permet l'obtention de FmCOF modélisés nettement moins bien corrélés ($R^2 = 0,47$). Nous notons notamment une très forte surestimation pour le bassin du Brusquet (FmCOF modélisé de 0,39 t/ha/an pour FmCOF estimé de 0,003 t/ha/an).

- Modélisation des FmCOF à partir du facteur Pre (notée MmPre): La corrélation entre les FmCOF et le facteur Pre peut se traduire par la relation suivante :

$$\text{eq 23) FmCOF (t/ha/an)} = 0,00064 \times \text{Pre (mm)} - 0,169$$

Ce modèle propose des valeurs de FmCOF s'écartant beaucoup plus de celles estimées ($R^2 = 0,36$). De par sa conception, il moyenne en effet les valeurs de Tn et Pt sur l'ensemble des bassins, et nous obtenons, en conséquence, des FmCOF proches de 0,4 t/ha/an. Cette valeur peut être considérée comme une moyenne interbassin.

B-2-2-3) Conclusion partielle

Les modèles simplifiés montrent que les FmCOF moyens sont fortement contrôlés par les caractéristiques géomorphologiques des bassins versants (taux de terrain nu et pentes). Le taux de terrain nu apparaît comme nettement prépondérant et suffit, seul, à une estimation correcte des flux moyens pour chaque bassin ($R^2 = 0,80$).

Le paramètre Pt ne suffit pas, seul, à l'obtention de flux moyens. Il permet par contre, une fois associé au facteur Tn, d'affiner la valeur des FmCOF moyens.

Le facteur Pre ne permet en aucun cas l'obtention de FmCOF moyens corrects. Il autorise, par contre, la prise en compte de la variabilité annuelle autour de ces moyennes.

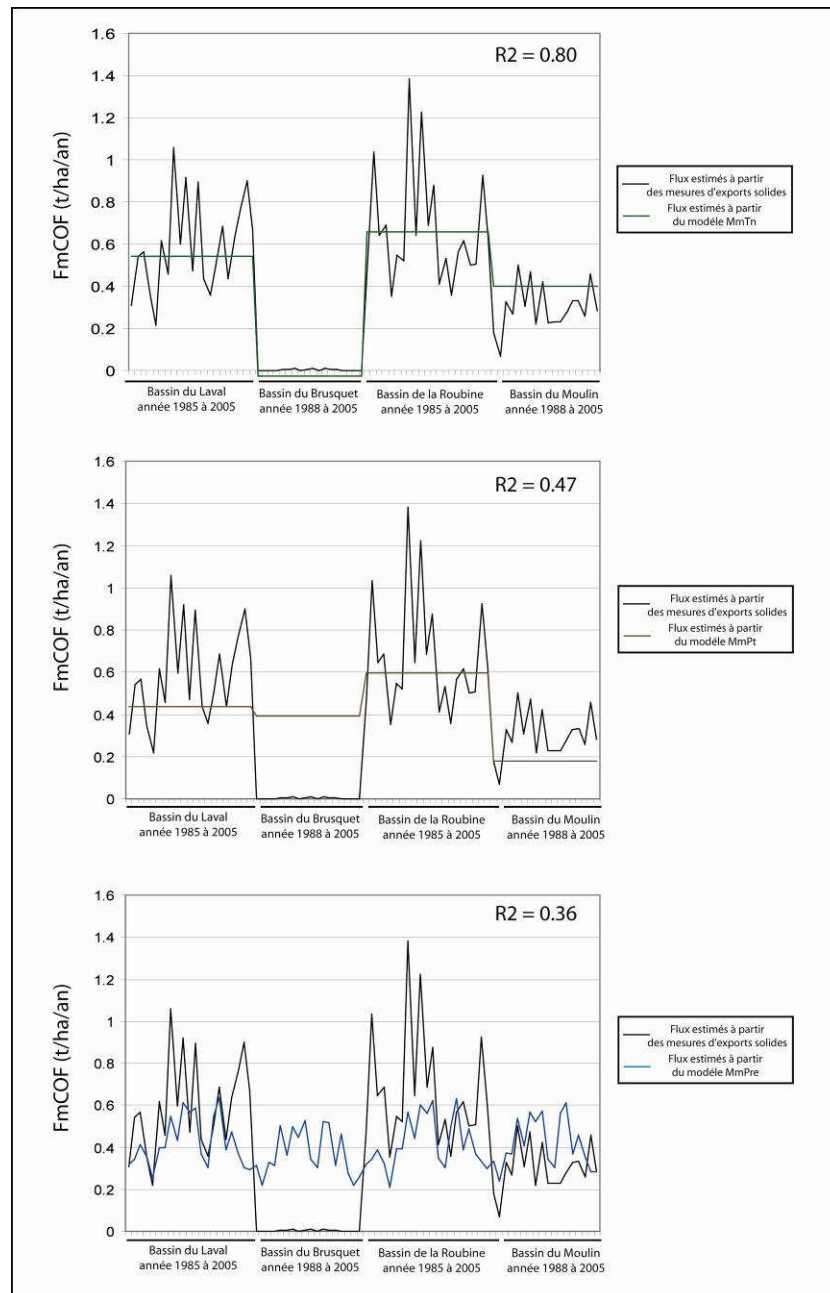


Figure V-17: Corrélations entre les FmCOF issus des mesures d'exports solides et les FmCOF issus des modélisations simples MmTn, MmPt et MmPre.

B-2-3) Test des modèles sur d'autres sites

Les modèles ayant été établis sur les bassins versants de Draix, nous avons choisi de les tester sur d'autres sites comparables sur lesquels nous disposions de données suffisantes.

B-2-3-1) Les sites retenus

Les sites retenus sont les bassins de Savournon et de Saignon (figure V-18).

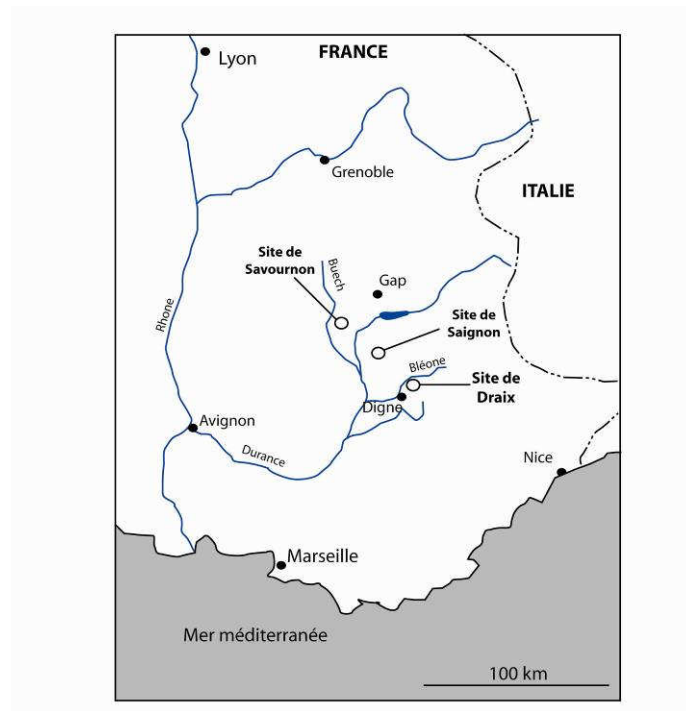


Figure V-18 : Localisation des sites retenus (sites du Savournon et du Saignon).

-Le bassin versant du Saignon (Rey, 2002 a et b): Ce bassin versant est situé au nord-est de Sisteron, sur la commune de La Motte du Caire. Sa superficie est de 380 ha et l'altitude varie entre 730 et 1474 mètres.

Ce bassin est constitué de 14 sous bassins versants de superficies variables (0,6 à 99,6 ha), creusés dans des terres noires calloviennes-oxfordiennes, présentant des couvertures végétales évoluant de 10 à 88%. L'installation de barrages RTM aux exutoires de ces bassins a permis la mesure de leurs productions sédimentaires pour les années 1996 et 1997 (tableau IV-7). Les précipitations annuelles, mesurées à la Motte du Caire, ont atteint 988 et 1096 pour chacune de ces deux années.

Ce jeu de données, caractérisé par l'absence d'information sur les pentes, nous permet cependant de tester les modèles simplifiés MmTnPre et MmTn.

Désignation des bassins versants	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
Période d'étude	1996-1997						1997							
Surface bassin (ha)	1,4	5,5	31,7	4	1	99,6	95,4	23,7	70,5	34,4	0,6	15,8	0,9	0,9
Surface marnes nues (ha)	0,3	2,3	18,2	2,9	0,9	12,5	17,8	6,1	22,5	11,8	0,2	9	0,7	0,8
Recouvrement végétal (%)	81	58	43	27	12	87	81	79	68	66	65	43	21	21
Position dominante de la végétation	B	H	H	H	H	H	B	H	H	H	H	H	H	H
Production spécifique de sédiments (t/ha.an)	29	16	37	29	51	4	18	30	24	20	54	95	178	145

*Tableau V-7 : Remplissage des retenues de barrages RTM et production spécifique de sédiments par bassin versant (rapportée à la surface totale du bassin)
H = amont et B = aval des bassins versants (Rey et al, 2002).*

-Les bassins versants du Savournon (Olivry et Hoorelbeck, 1990): Les bassins Savournon I et Savournon II sont des bassins emboîtés, situés dans la vallée du Buech à proximité de la commune de Serre. Ils sont creusés dans des terres noires calloviennes. Leurs surfaces sont de 7,84 et 75 ha pour des taux de terrain non végétalisé de 50 et 19 %. Les pentes moyennes ne sont pas indiquées, bien que les pentes supérieures à 35 % concernent 77 % de la surface du Savournon I et 40 % de celle du Savournon II.

Le suivi des exports solides (MES et CF) et des précipitations a été effectué durant les années 1985, 1986 et 1987 (tableau V-8). Ces données nous permettent, ici encore, de tester les modèles simplifiés MmTnPre et MmTn.

Bassin versant	Année	Superficie (ha)	Précipitations annuelles (mm)
Savournon 1	1985	7.84	800
	1986	7.84	940
	1987	7.84	1040
Savournon 2	1985	75	800
	1986	75	940
	1987	75	1040
Bassin versant	Export solide (t/ha/an)	Taux de terrain non végétalisé (%)	% de végétation clairesemée
Savournon 1	72.45	50	31
	46.68	50	31
	85.84	50	31
Savournon 2	45.33	19	38
	23.92	19	38
	39.39	19	38

Tableau V-8 : Exports solides, taux de terrain végétalisé, pentes et précipitations annuelles des bassins versants de Savournon, année 1985 à 1985 (d'après Olivry et Hoorelbeck, 1990).

B-2-3-2) Confrontation entre les exports estimés et les exports modélisés

-Le bassin versant du Saignon : Les FmCOF estimés⁹³ à partir des données mesurées⁹⁴, et ceux obtenus à partir des modélisations MmTnPre et MmTn sont présentés dans le tableau V-9 et dans la figure V-21.

Les valeurs sont relativement proches ($R^2 = 0,63$) (tableau V-9 et figure V-19). Nous notons cependant une nette surestimation pour les sous bassins II, III, IV et V, qui n'a pas pu être expliquée par la taille des bassins, ni par la position de la végétation (secteur amont ou aval des sous bassins)⁹⁵.

bassins versants	FmCOF estimés (t/ha/an)	modélisation MmTnPre des FmCOF (t/ha/an)	modélisation MmTn des FmCOF (t/ha/an)
I	0.145	0.120	0.036
II	0.080	0.346	0.274
III	0.185	0.494	0.429
IV	0.145	0.651	0.594
V	0.255	0.799	0.749
VI	0.020	0.061	-0.026
VII	0.090	0.120	0.036
VIII	0.150	0.140	0.057
IX	0.120	0.248	0.171
X	0.100	0.268	0.191
XI	0.270	0.277	0.202
XII	0.475	0.494	0.429
XIII	0.890	0.710	0.656
XIV	0.725	0.710	0.656

Tableau V-9 : FmCOF des sous bassins du Saignon estimés à partir des flux solides et FmCOF modélisés selon MmTnPre et MmTn.

En dépit de ce problème, nous retenons le fait que les modèles MmTnPre et MmTn permettent, par contre, la modélisation de FmCOF moyens correcte à l'échelle du bassin du Saignon dans son intégralité. Les FmCOF moyens modélisés sont, en effet, de 0,20 et 0,12 t/ha/an, pour un FmCOF moyen estimé de 0,11 t/ha/an (figure V-21).

⁹³ Les FmCOF ont été estimés de la même manière que pour les bassins de Draix (FmCOF = export solide \times 0,5%). Cette valeur de 0,5% (COT moyen) a été retenue car elle correspond à la moyenne établie par Artru en 1972 sur 6000 échantillons de terres noires du Sud Est de la France.

⁹⁴ Les exports solides des sous bassins I, II, III, IX X et XI ont été effectués et moyennés sur les années 1996 et 1997. Nous avons donc modélisé les FmCOF de ces bassins à partir de la moyenne des précipitations sur ces deux années (modélisation MmTnPre).

⁹⁵ Ce même phénomène a cependant été observé par F. Rey (2002) et expliqué par le fait qu'il n'existe pas de relation linéaire entre l'augmentation de la couverture végétale et la diminution de la production sédimentaire (figure V-20).

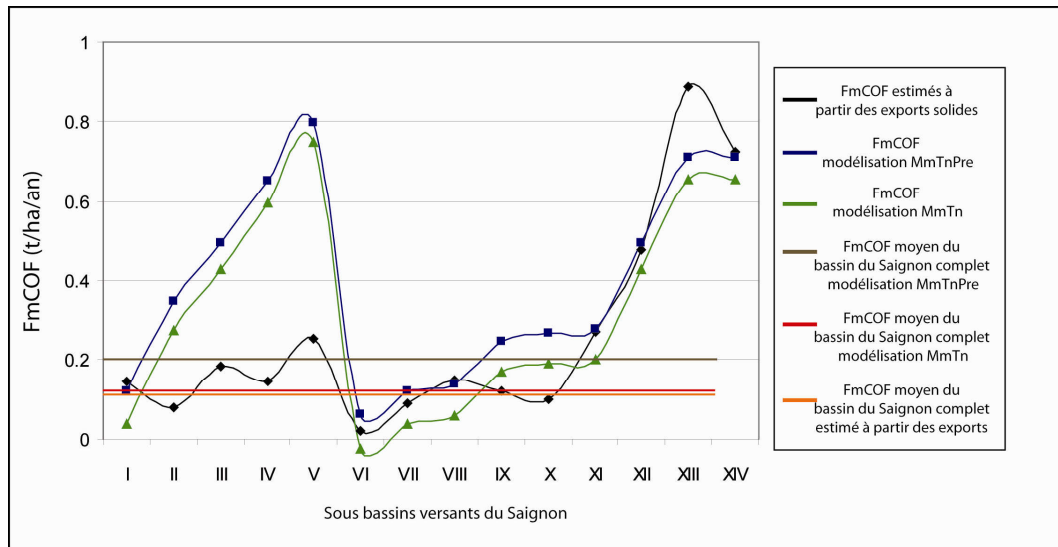


Figure V-19: FmCOF des sous bassins versants du Saignon estimés à partir des flux de matériel solide et FmCOF modélisés selon MmTnPre et MmTn.

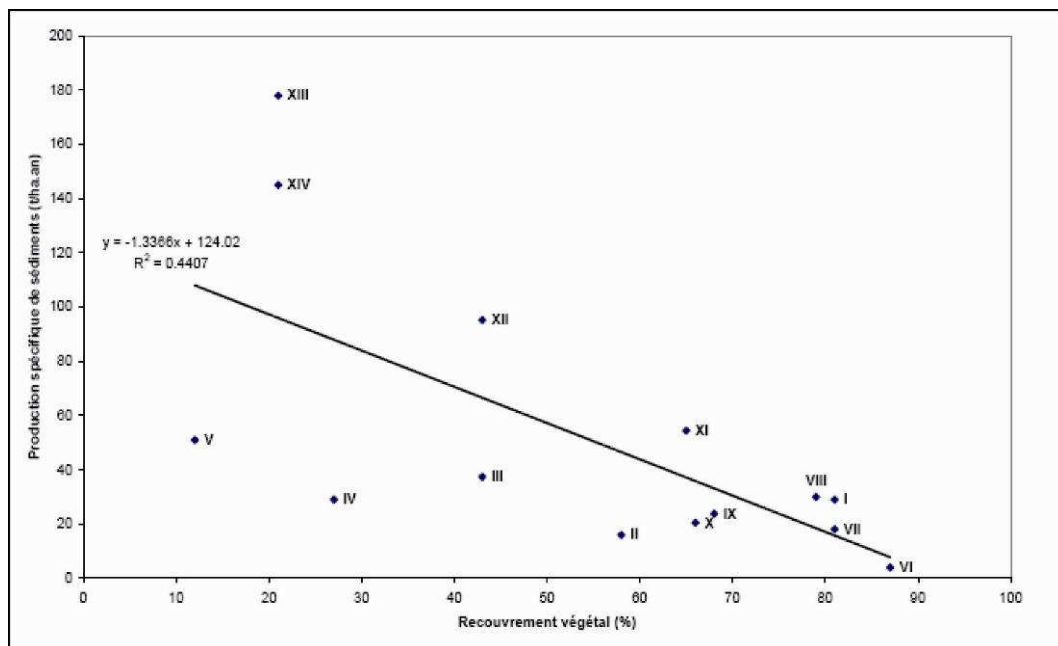


Figure V-20 : Relations entre production sédimentaire et couverture végétale des bassins versants du Saignon pour l'année 1997(Rey, 2002a).

-Les bassins versants de Savournon : Les modélisations MmTnPre et MmTn permettent l'obtention de FmCOF très proches de ceux estimés à partir des flux de matériels solides pour le bassin Savournon I (tableau V-10, figure V-21). Les FmCOF moyens modélisés sont de 0,356 et 0,357 t/ha/an pour une moyenne interannuelle estimée de 0,342 t/ha/an.

Les flux modélisés pour le bassin versant du Savournon II sont par contre systématiquement sous-estimés. Les FmCOF moyens modélisés par MmTnPre et MmTn se limitent en effet à 0,051 et 0,036 t/ha/an pour une moyenne estimée à 0,181 t/ha/an.

Bassin versant	année	FmCOF estimés (t/ha/an)	modélisation MmTnPre des FmCOF (t/ha/an)	modélisation MmTn des FmCOF (t/ha/an)
Savournon 1	1985	0.362	0.305	0.357
	1986	0.233	0.361	0.357
	1987	0.429	0.401	0.357
Savournon 2	1985	0.227	0.000	0.036
	1986	0.120	0.056	0.036
	1987	0.197	0.096	0.036

Tableau V-10 : FmCOF des bassins de Savournon estimés à partir des flux solides et FmCOF modélisés selon MmTnPre et MmTn.

Ce problème est vraisemblablement lié au fait que nous n'avons pas pris en compte les contributions possibles des surfaces à végétation clairsemée des bassins du Savournon I et II (31 et 38%), dont nous ne connaissons pas les impacts sur les FmCOF. Il semblerait toutefois que, à taux de terrain non végétalisé proche, le bassin du Savournon II soit plus productif que celui du Brusquet.

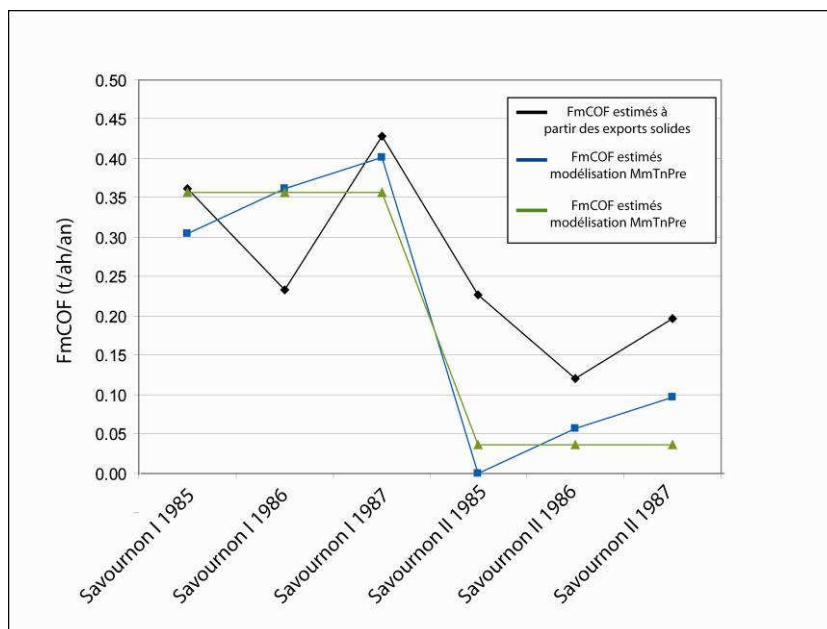


Figure V-21: FmCOF des bassins de Savournon estimés à partir des flux solides et FmCOF modélisés selon MmTnPre et MmTn.

B-2-3-3) Conclusion partielle

Ces tests montrent que les modélisations des FmCOF établies sur les bassins de Draix permettent l'obtention de FmCOF avec des ordres de grandeurs correctes sur d'autres bassins du sud-est de la France. Ceux-ci peuvent, par-contre, être sous, ou surestimés à petite échelle (<75 ha).

Les modèles proposés semblent nettement plus précis sur de plus grandes surfaces, comme celle du bassin du Saignon dans son intégralité (390 ha).

B-3) Modélisations des FcCOF

L'approche et la stratégie des modélisations de FcCOF ayant été identiques à celles de FmCOF, nous les présenterons selon un plan identique.

Cependant, au vu des relations inverses entre les flux et les facteurs pente et terrain non végétalisé, (cf. § A-3-3-1), nous construirons nos équations en utilisant les facteurs 1-Tn et 1-Pt.

B-3-1) Modélisations des FcCOF selon les facteurs Tn, Pt et Pre

Les données initiales sont présentées dans le tableau V-11.

bassin versant	année	FcCOF (t/ah/an à partir des flux de matériels dissouts)	Taux de terrain nu (%)	pentes (%)	précipitation (mm)
Laval	1985	0.0160	68	58	762.00
	1986	0.0127	68	58	801.00
	1987	0.0173	68	58	914.50
	1988	0.0193	68	58	820.50
	1989	0.0040	68	58	666.00
	1990	0.0153	68	58	885.00
	1991	0.0127	68	58	887.00
	1992	0.0280	68	58	1126.00
	1993	0.0100	68	58	945.50
	1994	0.0213	68	58	1227.00
	1995	0.0240	68	58	1155.00
	1996	0.0147	68	58	1187.50
	1997	0.0253	68	58	839.50
	1998	0.0160	68	58	743.00
	1999	0.0240	68	58	1120.00
	2000	0.0353	68	58	1259.00
	2001	0.0220	68	58	869.50
	2002	0.0227	68	58	1004.50
Moulin	1988	0.0081	54	30	785.67
	1989	0.0110	54	30	640.00
	1991	0.0147	54	30	842.33
	1992	0.0396	54	30	1105.33
	1993	0.0220	54	30	906.33
	1994	0.0198	54	30	1149.67
	1995	0.0249	54	30	1081.00
	1996	0.0330	54	30	1158.67
	1997	0.0139	54	30	804.67
	1998	0.0440	54	30	743.00
	1999	0.0601	54	30	1146.33
	2000	0.0527	54	30	1220.67
Roubine	2001	0.0535	54	30	839.67
	2002	0.0784	54	30	980.67
	1985	0.0105	79	30	762.00
	1986	0.0112	79	75	806.00
	1987	0.0077	79	75	876.00
	1988	0.0091	79	75	774.00
	1989	0.0063	79	75	593.00
	1990	0.0098	79	75	878.00
	1991	0.0084	79	75	877.00
	1992	0.0077	79	75	1154.00
	1993	0.0070	79	75	956.00
	1994	0.0190	79	75	1209.00
	1995	0.0084	79	75	1145.00
	1996	0.0154	79	75	1242.00
	1997	0.0119	79	75	809.00
	1998	0.0070	79	75	743.00
	1999	0.0070	79	75	1041.00
	2000	0.0190	79	75	1253.00
	2001	0.0147	79	75	875.00
	2002	0.0112	79	75	1025.00

Tableau V-11 : Données initiales pour la modélisation des FcCOF.

B-3-1-1) Modélisation des FcCOF à partir d'une régression linéaire multiple (notée McL)

La corrélation entre les FmCOF et les facteurs Tn, Pt et Pre se traduit par la relation suivante :

$$\text{eq 24) FcCOF (t/ha/an)} = -0,045 \times \frac{1 - Tn (\%)}{100} + 0,076 \times \frac{1 - Pt (\%)}{100} + 2,59.10^{-5} \times Pre \text{ (mm)} - 0,023$$

Les résultats sont présentés dans la figure V-22.

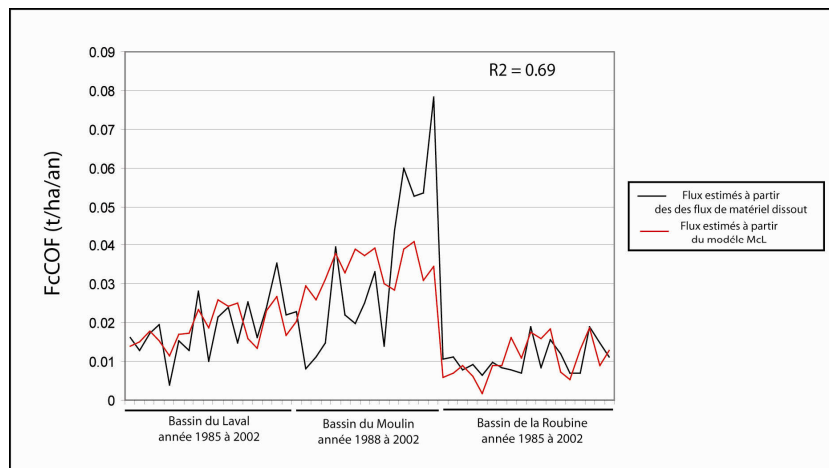


Figure V-22: Corrélation entre les FcCOF issus des flux de matériel dissous et les FcCOF issus de la modélisation McL.

Le modèle McL permet l'obtention de FcCOF proches des ceux estimés à partir des mesures de flux dissous ($R^2 = 0,69$). Les flux modélisés moyens pour les bassins du Laval, du Moulin et de la Roubine atteignent 0,019 , 0,033 , 0,011 t/ha/an, comparables aux flux estimés de 0,016 , 0,034 et 0,011 t/ha/an.

Nous remarquons, par contre, le contrôle négatif du facteur $1-Tn$ sur les FcCOF, ce qui est étonnant compte tenu des précédentes observations (cf. § V-A-3-4-2). En testant le modèle, nous nous sommes rendu compte que nous pouvions « jouer » sur les constantes et obtenir différentes relations permettant le calcul des mêmes FcCOF. Nous en présentons une

à titre d'exemple (notée McL2, figure V-23), montrant un contrôle positif du facteur 1-Tn sur les FcCOF⁹⁶.

$$\text{eq 25) } FcCOF \text{ (t/ha/an)} = 0,066 \times \frac{1 - Tn (\%)}{100} + 0,015 \times \frac{1 - Pt (\%)}{100} + 2,65 \cdot 10^{-5} \times Pre \text{ (mm)} - 0,033$$

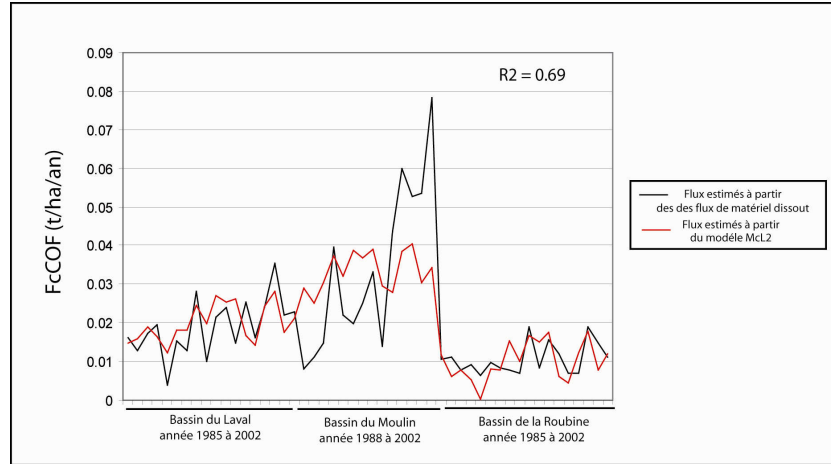


Figure V-23: Corrélations entre les FcCOF issus des flux de matériel dissout et les FcCOF issus de la modélisation McL2.

B-3-1-2) Modélisations des FcCOF en discriminant flux sur terrain non végétalisé (FmCOFn) et flux sur terrain végétalisé (FcCOFv) (notées McNV)

Nous reprenons le même raisonnement que pour les modélisations MmNV et nous discriminons les flux sur terrain non végétalisé (FcCOFn) des flux sur terrain végétalisé (FcCOFv). Cette modélisation se traduit par la relation :

$$\text{eq 26) } FcCOF \text{ (t/ha/an)} = FcCOFc \times \frac{1 - Tn (\%)}{100} + FcCOFn \times \frac{Tn (\%)}{100}$$

⁹⁶ Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que les facteurs Tn et Pt (et inversement 1-Tn et 1-Pt) augmentent de façon concordante du bassin du Moulin vers le Laval, puis la Roubine (cf. § A-3-4-1). Nous ne pouvons, de fait, discriminer leurs effets sur les FcCOF.

Elle peut être, à nouveau, résolue selon deux approches :

Approche 1 : Nous pouvons considérer que les flux sont nuls à précipitation nulle. Les FcCOFn et FcCOFv se calculent alors de la façon suivante (modélisation notée McNV1) :

$$\text{eq 27) FcCOFv (t/ha/an)} = a \times \frac{1 - \text{Pt (\%)}}{100} \times \text{Pre (mm)}$$

$$\text{eq 28) FcCOFn (t/ha/an)} = b \times \frac{1 - \text{Pt (\%)}}{100} \times \text{Pre (mm)}$$

Approche 2 : Nous pouvons aussi raisonner de manière plus linéaire et calculer les FcCOFn et FmCOFv de la façon suivante (modélisation notée McNV2) :

$$\text{eq 29) FcCOFv (t/ha/an)} = a \times \frac{\text{Pt (\%)}}{100} + b \times \text{Pre (mm)}$$

$$\text{eq 30) FcCOFn (t/ha/an)} = c \times \frac{\text{Pt (\%)}}{100} + d \times \text{Pre (mm)}$$

Les développements et résolutions de ces équations sont identiques à ceux présentés pour les modélisations MmNV1 et 2 (cf. § V-B-2-1-2). Les modèles McNV 1 et 2 se traduisent par les équations suivantes⁹⁷:

McNV1 :

$$\text{eq 31) FcCOF (t/ha/an)} = \left(6,26 \cdot 10^{-8} \times \frac{1 - \text{Pt (\%)}}{100} \times \text{Pre}^2 (\text{mm}) \right) \times \frac{1 - \text{Tn (\%)}}{100} + \left(3,77 \cdot 10^{-8} \times \frac{1 - \text{Pt (\%)}}{100} \times \text{Pre}^2 (\text{mm}) \right) \times \frac{\text{Tn (\%)}}{100}$$

et McNV2 :

$$\text{eq 32) FcCOF (t/ha/an)} = \left(0,021 \times \frac{1 - \text{Pt (\%)}}{100} + 9,55 \cdot 10^{-5} \times \text{Pre (mm)} \right) \times \frac{1 - \text{Tn (\%)}}{100} - \left(0,034 \times \frac{1 - \text{Pt (\%)}}{100} + 4,46 \cdot 10^{-6} \times \text{Pre (mm)} \right) \times \frac{\text{Tn (\%)}}{100}$$

⁹⁷ Le facteur Pre a été élevé à la puissance 2 de façon empirique et permet une amélioration des R².

Le modèle McNV1 (figure V-24) permet l'obtention de FcCOF satisfaisants par rapport à ceux estimés à partir des mesures de flux dissous ($R^2 = 0,69$). Les flux modélisés moyens des bassins du Laval, du Moulin et de la Roubine atteignent 0,018 , 0,033 , 0,010 t/ha/an et sont directement comparables aux flux estimés de 0,016 , 0,034 , 0,011 t/ha/an.

Les FcCOFv moyens atteignent 0,025 , 0,042 et 0,015 t/ha/an pour les bassins du Laval, du Moulin et de la Roubine. Les FcCOFn sont, par contre, systématiquement plus faibles (0,015 , 0,025, et 0,009 t/ha/an pour les bassins du Laval, du Moulin et de la Roubine).

Le modèle McNV2 (figure V-257) permet l'obtention de FcCOF modélisés tout aussi satisfaisants ($R^2 = 0,71$). Les flux modélisés moyens atteignent, pour les bassins du Laval, du Moulin et de la Roubine, 0,020 , 0,034 , 0,010 t/ha/an et sont directement comparables aux flux estimés de 0,016 , 0,034 , 0,011 t/ha/an.

Les FcCOFv sont élevés et très proches d'un bassin à l'autre (en moyenne 0,10 , 0,11 et 0,10 t/ha/an pour les bassins du Laval, du Moulin et de la Roubine). Les FcCOFn sont par contre systématiquement négatifs (-0,018 , -0,027, et -0,013 t/ha/an).

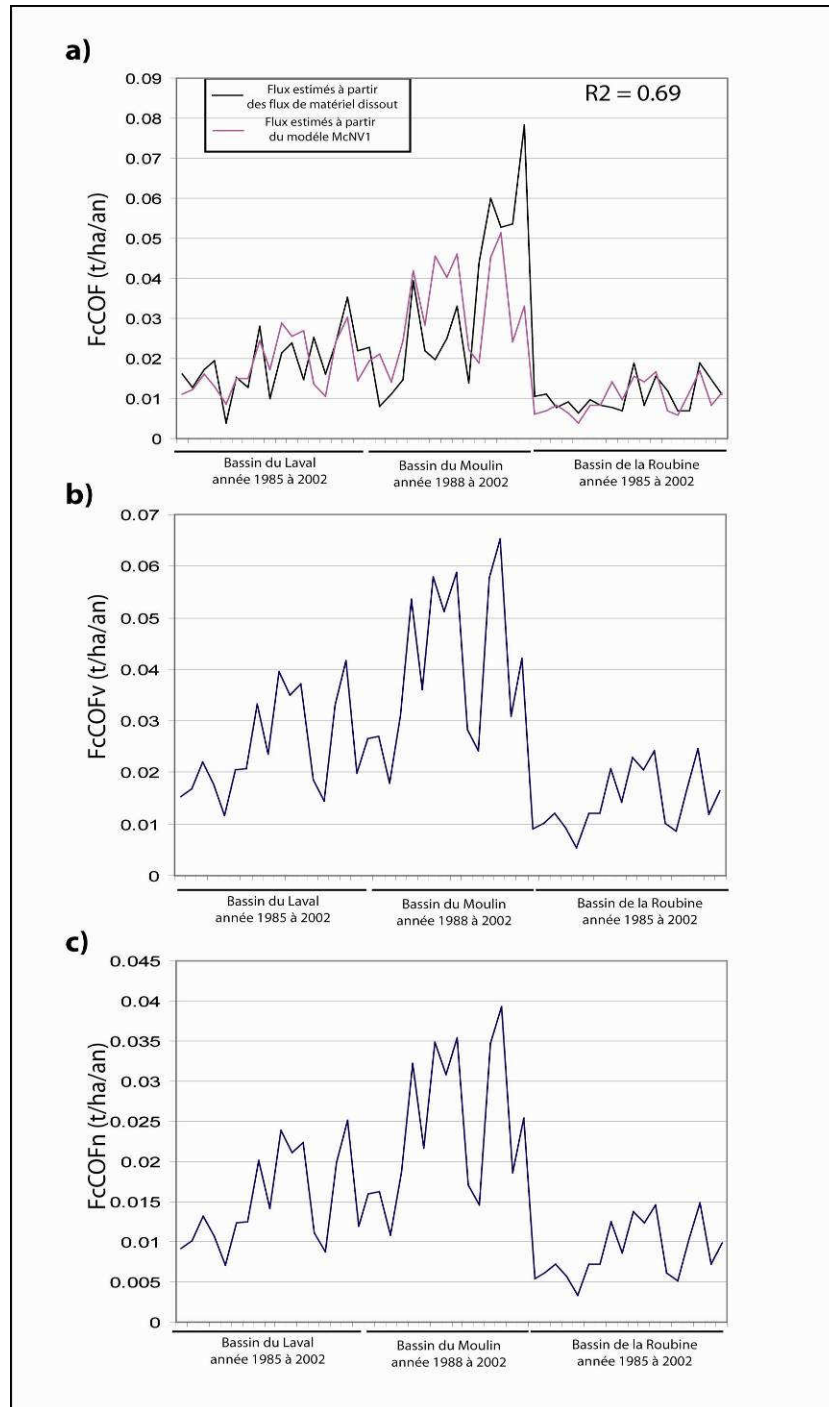


Figure V-24 : $FcCOF$ obtenus par la modélisation McNVI

a) corrélation entre les $FcCOF$ estimés à partir des flux de matériel dissout et les $FcCOF$ issus de la modélisation McNVI

b) $FcCOFv$ modélisés et c) $FcCOFn$ modélisés.

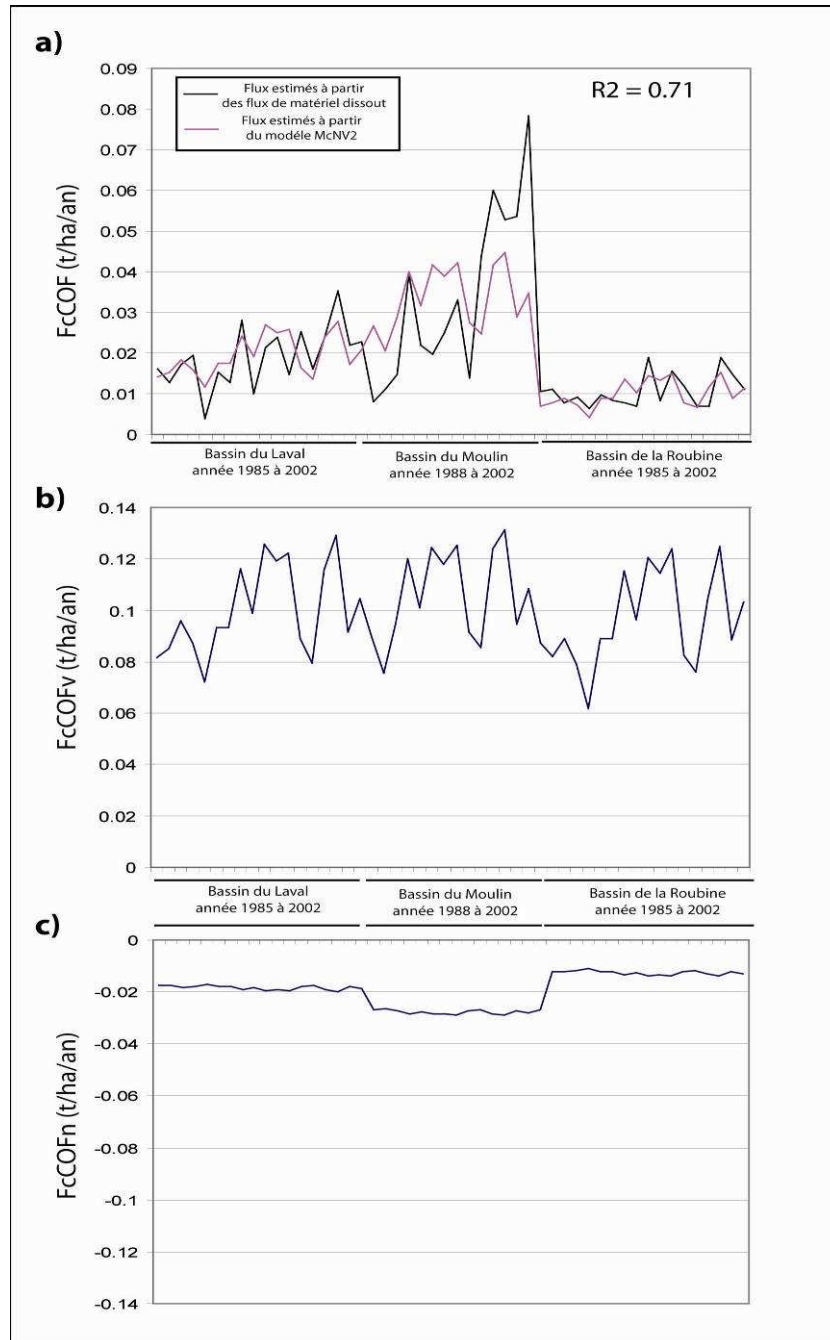


Figure V-25: $FmCOF$ obtenus par la modélisation MmNV2

- a) corrélation entre les $FcCOF$ estimés à partir des flux de matériel dissout et les $FcCOF$ issus de la modélisation MmNV1
- b) $FcCOFv$ modélisés et c) $FcCOFn$ modélisés.

B-3-1-3) Conclusion partielle

La modélisation des FcCOF à partir des trois facteurs Tn, Pt et Pre se révèle plus compliquée que celle des FmCOF. En effet, la possession de flux dissous sur les bassins du Laval, du Moulin, et de la Roubine ne permet pas de discriminer les contrôles exercés par les facteurs pente et taux de végétalisation sur l'altération chimique des roches⁹⁸.

Nous obtenons cependant des modèles satisfaisants à l'échelle de ces trois bassins. Le modèle McNV1 est plus particulièrement retenu car il offre : -1) une corrélation correcte entre FcCOF estimés et modélisés ($R^2 = 0,69$) ; -2) la possibilité de calculer des flux sur terrain végétalisé ou non végétalisé ; et -3) des valeurs de flux positives⁹⁹.

B-3-2) Modélisations simplifiées des FcCOF

B-3-2-1) Modélisations des FcCOF à partir de deux facteurs

L'ensemble des résultats obtenus est présenté dans la figure V-26.

Modélisation des FcCOF à partir des facteurs Tn et Pt (notée McTnPt): La corrélation entre les FcCOF et les facteurs Tn et Pt se traduit par la relation suivante :

$$\text{eq 33) FcCOF (t/ha/an)} = -0,35 \times \frac{1 - Tn (\%)}{100} + 0,071 \times \frac{1 - Pt (\%)}{100} + 0,00016$$

Ce modèle permet l'obtention de FcCOF moyens proches des moyennes interannuelles estimées à partir des mesures de flux solides ($R^2 = 0,61$). Ces flux sont de 0,019, 0,034, 0,011 t/ha/an pour les bassins du Laval, du Moulin et de la Roubine, et sont comparables aux estimations de 0,016, 0,034, 0,011 t/ha/an.

Tout comme pour la modélisation McL (cf. § V-B-3-1-1), nous remarquons que le facteur 1-Tn possède un contrôle négatif sur les FcCOF. Nous pouvons, à nouveau, « jouer »

⁹⁸ En raison de l'évolution synchrone des paramètres Tn et Pt pour les bassins du Moulin, Laval et la Roubine.

⁹⁹ Nous rappelons que nous avons observé une altération chimique des roches sur le terrain en contexte non végétalisé (durant les 6 mois passée entre les échantillonnages des profils 06-LA A et LA A R, cf. § IV-A-5-2-2), les FcCOFn ne peuvent donc être négatifs.

sur les constantes et obtenir différentes relations permettant le même calcul des FcCOF. Par exemple :

$$\text{eq 34) FcCOF (t/ha/an)} = 0,086 \times \frac{1 - Tn (\%)}{100} + 0,043 \times \frac{1 - Pt(\%)}{100} - 0,0092$$

- Modélisation des FcCOF à partir des facteurs Tn et Pre (notée McTnPre): La corrélation entre les FcCOF et les facteurs Tn et Pre se traduit par la relation suivante :

$$\text{eq 35) FcCOF (t/ha/an)} = 0,092 \times \frac{1 - Tn (\%)}{100} + 2,6.10^{-5} \times \text{Pre (mm)} - 0,034$$

Ce modèle permet de prendre en compte les variations annuelles de flux issues des fluctuations du facteur Pre. La corrélation s'en retrouve augmentée ($R^2 = 0,69$). Les FcCOF moyens modélisés atteignent 0,020 , 0,033 , 0,010 t/ha/an pour les bassins du Laval, du Moulin et de la Roubine pour des estimations de 0,016 , 0,034 , 0,011 t/ha/an.

- Modélisation des FcCOF à partir des facteurs Pt et Pre (notée McPtPre): La corrélation entre les FcCOF et les facteurs Tn et Pre se traduit par la relation suivante :

$$\text{eq 36) FcCOF (t/ha/an)} = 0,051 \times \frac{1 - Pt (\%)}{100} + 2,6.10^{-5} \times \text{Pre (mm)} - 0,027$$

Ce modèle est très semblable à McTnPre ($R^2 = 0,69$). Les FcCOF moyens modélisés sont de 0,019 , 0,033 , 0,010 t/ha/an pour les bassins du Laval, du Moulin et de la Roubine.

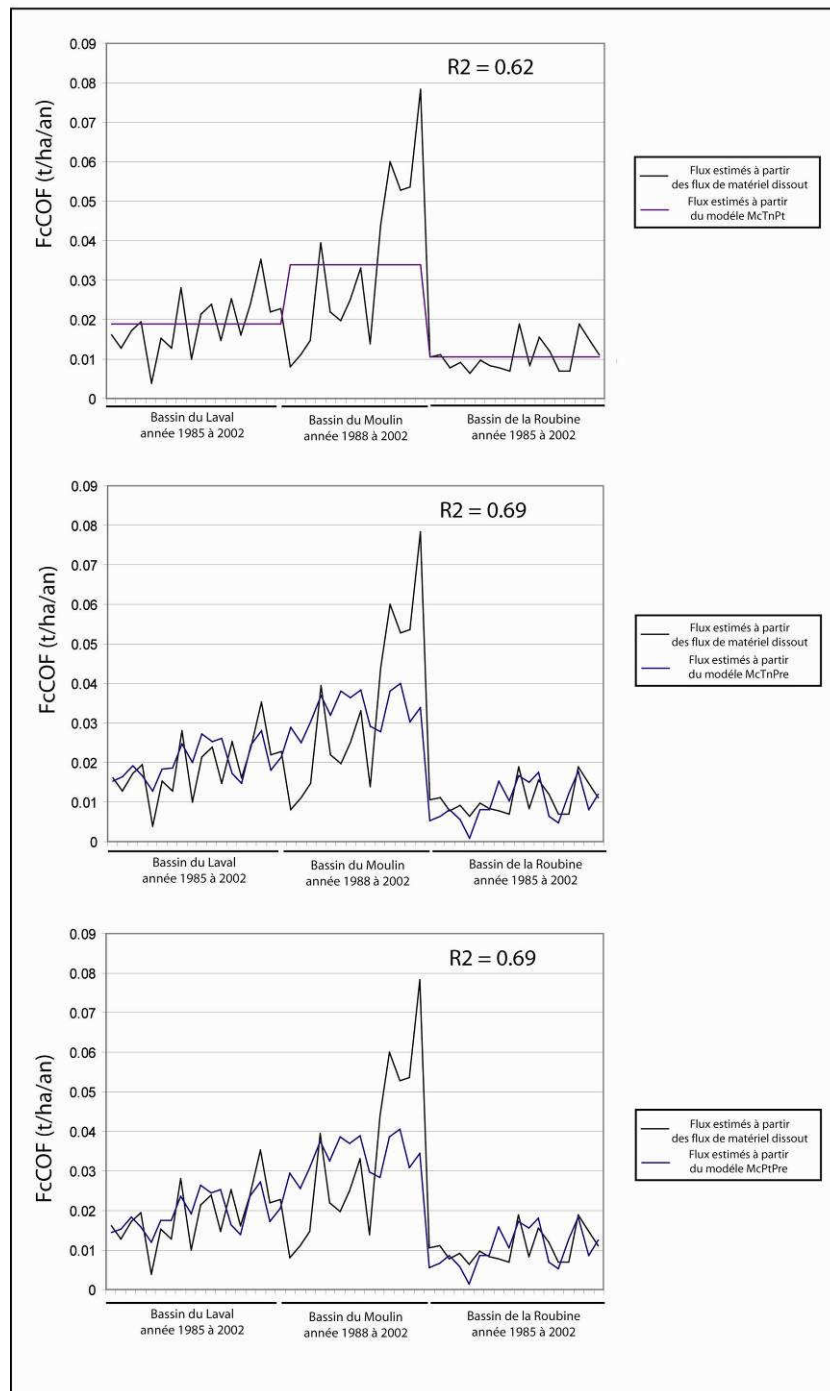


Figure V-26:
Corrélations entre les FcCOF estimés à partir des flux de matériel dissout et les FcCOF issus des modélisations McTnPt, McTnPre et McPtPre.

B-3-2-2) Modélisations des FcCOF à partir d'un facteur unique

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure V-27.

- Modélisation des FcCOF à partir du facteur Tn (Notée McTn): La corrélation entre les FcCOF et le facteur Tn se traduit par la relation suivante :

$$\text{eq 37) FcCOF (t/ha/an)} = 0,093 \times \frac{1 - Tn (\%)}{100} - 0,0096$$

Ce modèle McTn permet l'obtention de FcCOF moyens corrects par rapport aux moyennes interannuelles estimées ($R^2 = 0,61$). Les flux modélisés atteignent 0,020 , 0,033 et 0,010 t/ha/an pour les bassins du Laval, du Moulin, et de la Roubine, et sont comparables aux estimations de 0,019 , 0,034 et 0,011 t/ha/an.

- Modélisation des FcCOF à partir du facteur Pt (Notée McPt): La corrélation entre les FcCOF et le facteur Pt se traduit par la relation suivante :

$$\text{eq 38) FcCOF (t/ha/an)} = 0,052 \times \frac{1 - Pt (\%)}{100} - 0,0025$$

Le modèle McPt est semblable à McTn ($R^2 = 0,61$). Les flux moyens modélisés sont de 0,019 , 0,034 et 0,010 t/ha/an pour les bassins du Laval, du Moulin, et de la Roubine.

- Modélisation des FcCOF à partir du facteur Pre (Notée McPre): La corrélation entre les FcCOF et le facteur Pre se traduit par la relation suivante :

$$\text{eq 39) FcCOF (t/ha/an)} = 2,7.10^{-5} \times Pre (\text{mm}) - 0,0057$$

Ce modèle est nettement moins satisfaisant que les précédents ($R^2 = 0,33$). Les valeurs de FcCOF modélisées oscillent autour de 0,020 t/ha/an (moyenne interbassin).

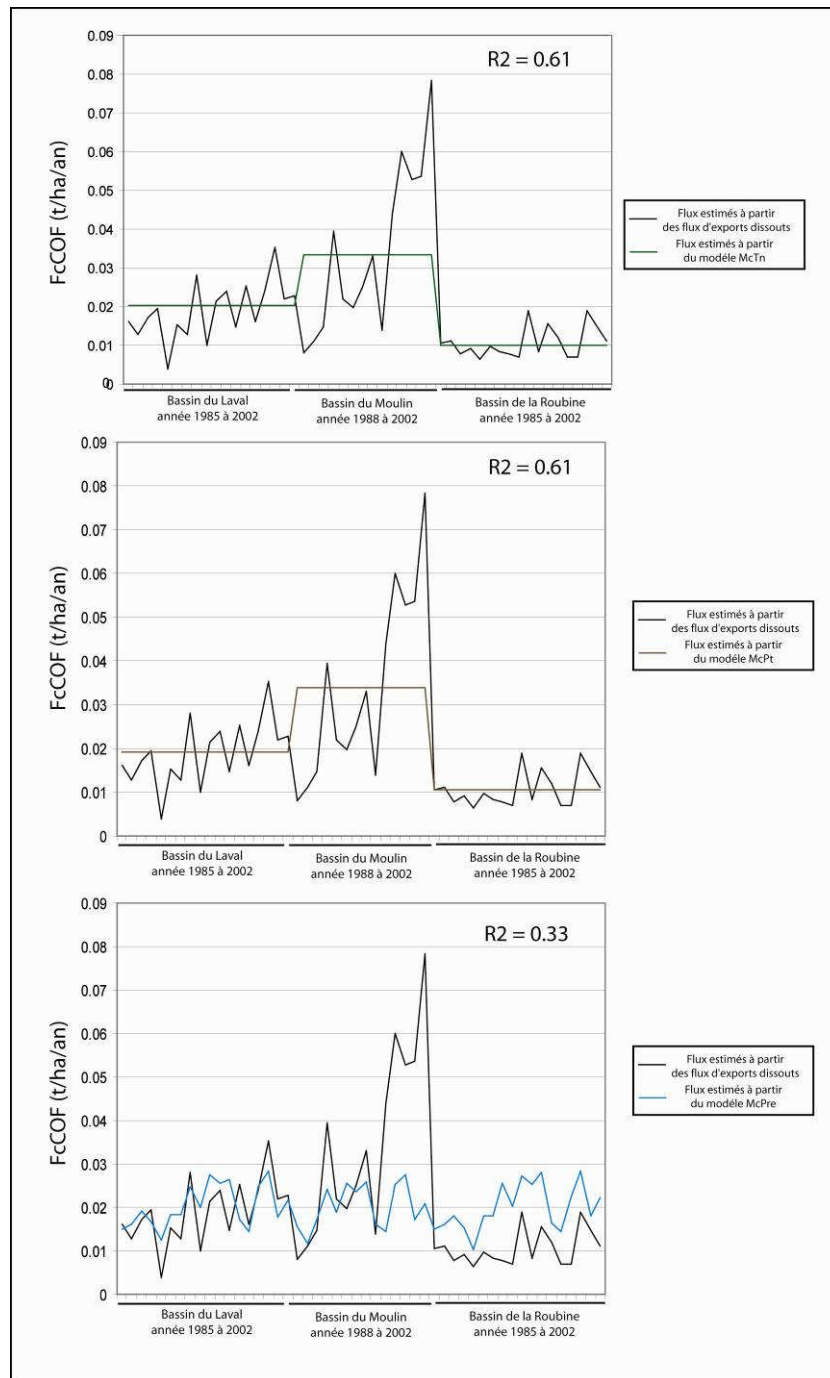


Figure V-27:
Corrélations entre les FcCOF estimés à partir des flux de matériel dissouts et les FcCOF issus des modélisations McTn, McPt et McPre.

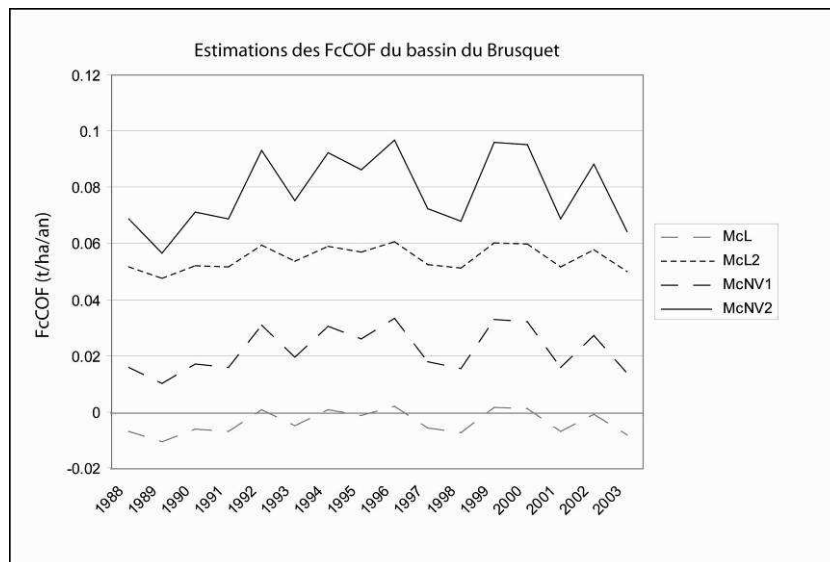
B-3-3) Evaluation des impacts des facteurs Tn et Pt sur les FcCOF et modélisation sur d'autres sites

Compte tenu de l'évolution synchrone des facteurs Tn et Pt, sur les bassins du Laval du Moulin et de la Roubine, il est pour l'heure très difficile de discriminer leurs impacts respectifs sur les FcCOF. Une tentative de résolution, très préliminaire, peut être entreprise en intégrant au raisonnement les résultats des modélisations de ces flux pour le bassin versant du Brusquet.

B-3-3-1) Estimations des FcCOF du bassin du Brusquet

Nous proposons des estimations de FcCOF du Brusquet à partir des modélisations McL, McL2, McNV1 et McNV2.

Les FcCOF obtenus, présentés dans la figure V-28, témoignent d'une très grande variabilité des résultats selon les modèles envisagés¹⁰⁰. Les valeurs moyennes évoluent, en effet, de -0,003 à 0,078 t/ha/an. Nous pouvons cependant écarter le modèle McL proposant des valeurs de flux négatives.



*Figure V-28 :
Estimations des FcCOF du Brusquet à partir des modélisations McL, McL2, McNV1 et McNV2.*

¹⁰⁰ Cette forte variabilité est liée au fait que les modèles attribuent des « poids » différents aux facteurs Tn et Pt.

Il en résulte que le FcCOF moyen du bassin du Brusquet est très probablement situé entre 0,02 et 0,08 t/ha/an. Les valeurs les plus fortes apparaissent comme étant les plus probables compte tenu du très fort taux de végétalisation de ce bassin (87%).

B-3-3-2) Influence des facteurs Tn, Pt sur les FcCOF

Les FcCOF modélisés pour le bassin du Brusquet se traduisent par des valeurs extrêmement faibles du rapport FmCOF / FcCOF (tableau V-12), variant entre 0,04 et 0,15 environ, comparativement à celles obtenues pour les autres bassins (8,82 à 61,82).

Bassin versant	FmCOF moyen (t/ha/an)	FcCOF moyen (t/ha/an)	FmCOF / FcCOF
Laval	0.59	0.019	31.05
Moulin	0.3	0.034	8.82
Roubine	0.68	0.011	61.82
Brusquet	0.003	0.02 à 0.08 (modélisation)	0.04 à 0.15

Tableau V-12 : FmCOF moyen, FcCOF moyen et rapport FmCOF / FcCOF des bassins versants étudiés

Ces données nous permettent de confronter l'ensemble des valeurs de FcCOF et FmCOF / FcCOF obtenues sur les quatre bassins, aux facteurs Tn et Pt.

Nous remarquons :

- une possible relation inverse entre FcCOF et Tn (si on considère la valeur moyenne de 0,08 t/ha/an comme étant la plus probable pour les FcCOF du Brusquet, figure V-29-a), alors qu'aucune tendance n'est décelable entre FcCOF et Pt (figure V-29-b) ;
- une nette relation positive entre FmCOF / FcCOF et Tn (figure V-30), alors qu'aucune tendance n'est décelable entre FmCOF / FcCOF et Pt.

Ces résultats suggèrent que le facteur Tn impacte beaucoup plus les FcCOF que le facteur Pt.

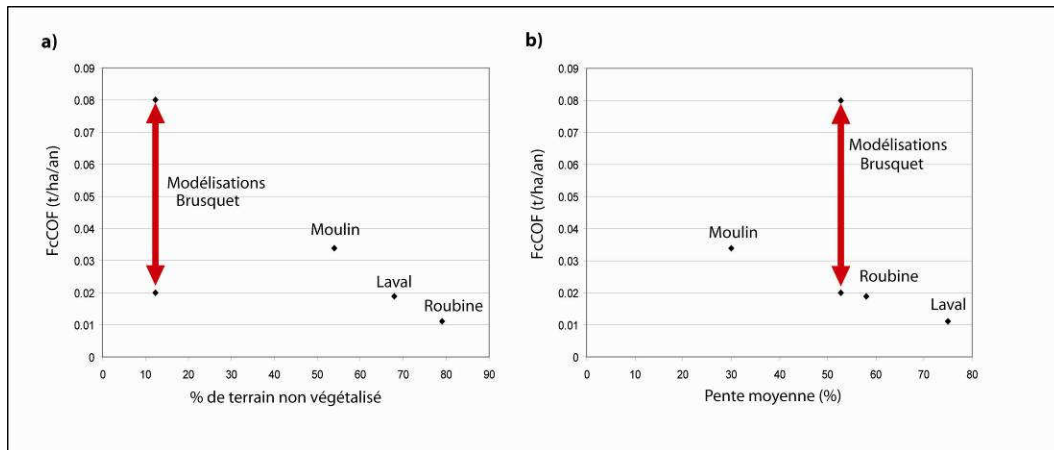


Figure V-29: Corrélations entre les FcCOF moyens et les facteurs taux de terrain non végétalisé (a) et pente (b) (avec prise en compte des valeurs modélisées du Brusquet).

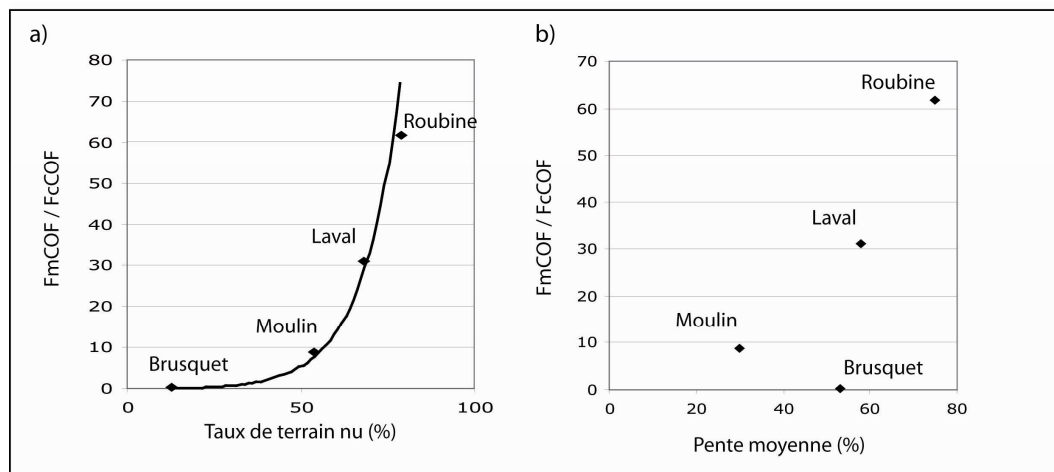


Figure V-30 : Corrélations entre les rapports FmCOF / FcCOF moyens et les facteurs taux de terrain non végétalisé (a) et pente (b). (avec prise en compte des valeurs modélisées du Brusquet).

B-3-3-3) Application des modélisations des FcCOF sur d'autres sites

Les données disponibles sur les sites du Saignon et du Savournon (cf. § V-B-2-3) autorisent l'utilisation de modèles intégrant les facteurs Tn et Pre. Nous venons de suggérer que le facteur Tn possède un impact plus important sur les FcCOF que le facteur Pt. Nous pouvons donc proposer des modélisations de FcCOF sur ces sites, qui, sans être vérifiables ou définitives, peuvent être considérées comme pertinentes.

-Les bassins versants du Saignon : Les FcCOF obtenus sont extrêmement comparables d'un modèle à un autre (tableau V-13 et figure V-31). A l'échelle de l'ensemble du bassin du Saignon, nous obtenons un FcCOF moyen se limitant à 0,061 et 0,058 t/ha/an (modèles McTnPre et McTn). Ces valeurs sont relativement faibles comparativement à celles des FmCOF obtenues précédemment (0,20 et 0,12 t/ha/an par les modélisations MmTnPre et MmTn, cf. § V-B-2-3-2). Ceci se traduit par des rapports FmCOF / FcCOF variant entre 2 et 3,5 pour un taux de terrain nu de l'ordre de 27%.

Ces flux sont par contre très variables d'un sous bassin à un autre, oscillant entre 0,004 et 0,073 t/ha/an (modèle McTnPre), et 0,0015 et 0,071 t/ha/an (modèle McTn).

bassins versants	FmCOF en t/ha/an (modélisation McTnPre)	FmCOF en t/ha/an (modélisation McTn)
I	0.068	0.066
II	0.046	0.044
III	0.033	0.030
IV	0.018	0.016
V	0.004	0.002
VI	0.073	0.071
VII	0.069	0.066
VIII	0.067	0.064
IX	0.057	0.054
X	0.055	0.052
XI	0.054	0.051
XII	0.034	0.030
XIII	0.014	0.010
XIV	0.014	0.010
Saignon	0.061	0.058

Tableau V-13 : FcCOF des sous bassins du Saignon modélisés selon McTnPre et McTn.

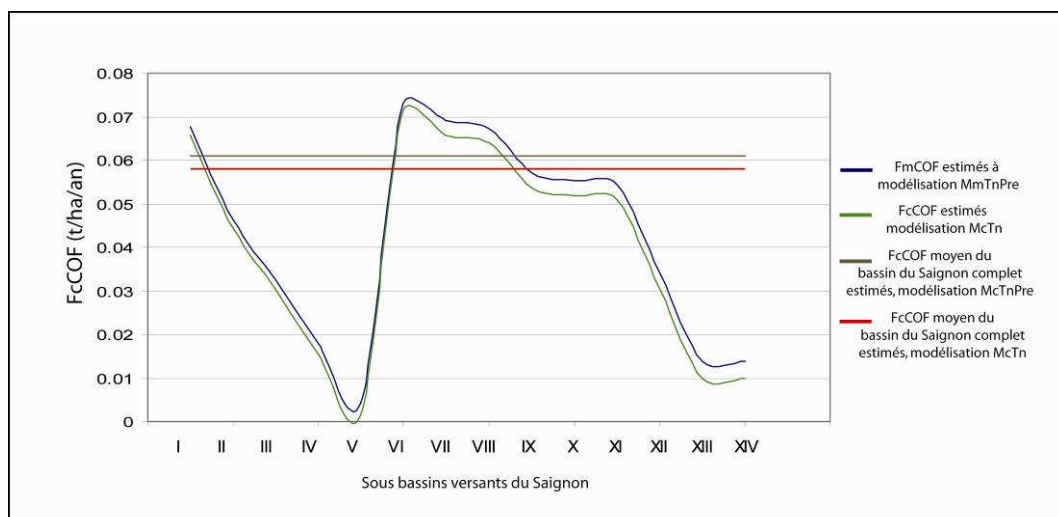


Figure V-31: FcCOF modélisés des sous bassins du Saignon (modèles McTnPre et McTn).

-Les bassins versants de Savournon : Ici encore, les résultats apparaissent très comparables d'un modèle à un autre (tableau V-14, figure V-32). Les FcCOF modélisés selon McTnPre oscillent entre 0,033 - 0,039 t/ha/an (Savournon I) et 0,061 - 0,068 (Savournon II). Les FcCOF modélisés selon McTn sont l'expression des FcCOF moyens de ces bassins. Ils se limitent à 0,037 (Savournon I) et 0,066 t/ha/an (Savournon II).

Nous remarquons, pour le Savournon 1, que le FcCOF moyen (0,037 t/ha/an) est très nettement inférieur au FmCOF moyen (0,357 t/ha/an) (cf. § V-B-2-3-2). Ces flux s'équilibrent par contre pour le bassin du Savournon II (0,036 et 0,066 t/ha/an).

Ces estimation illustrent l'impact du couvert végétal sur les transferts de COF (les rapports FmCOF / FcCOF sont de 9,65 pour le Savournon I et 0,54 pour le Savournon II).

Bassin versant	année	FmCOF estimés (t/ha/an)	modélisation MmTnPre des FmCOF (t/ha/an)	modélisation MmTn des FmCOF (t/ha/an)	Couvert végétal (%)
Savournon 1	1985	0.362	0.305	0.357	50
	1986	0.233	0.361	0.357	50
	1987	0.429	0.401	0.357	50
Savournon 2	1985	0.227	0.000	0.036	19
	1986	0.120	0.056	0.036	19
	1987	0.197	0.096	0.036	19

Tableau V-14 : FcCOF des bassins de Savournon modélisés selon McTnPre et McTn.

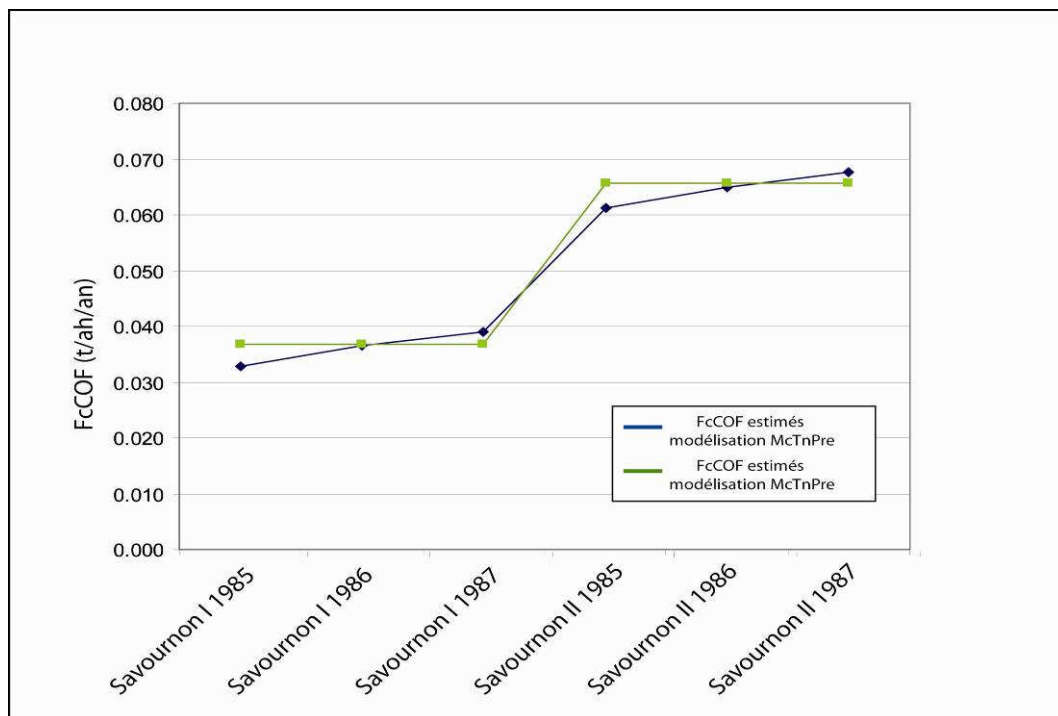


Figure V-32: FcCOF modélisés des bassins de Savournon (modèles McTnPre et McTn).

B-4) Conclusion

Nous avons développé et discuté différents modèles permettant le calcul sur les bassins de Draix des flux de COF libéré par les altérations mécaniques et chimiques. Ces modèles montrent que :

- les variations de flux, d'un bassin à l'autre, peuvent être décrites par les paramètres géomorphologiques (taux de terrain non végétalisé et pentes). Le taux de terrain non végétalisé apparaît comme le facteur dominant pour les FmCOF et pourrait aussi l'être pour les FcCOF. Ce dernier point demeure cependant à préciser ;
- les variations de flux d'une année sur l'autre au sein d'un même bassin sont contrôlées par les précipitations moyennes annuelles.

L'élaboration sur les bassins de Draix de modèles simplifiés (à partir de un ou deux facteurs) a permis de les tester sur d'autres sites du Sud Est de la France (Savournon et Saignon).

Il apparaît que :

- les modèles de FmCOF sont utilisables sur d'autres bassins que ceux de Draix, à condition que leur taille soit significative (>75ha) ;
- il est possible de proposer des FcCOF à partir de données simples telles que taux de terrain non végétalisé, pente et précipitation sur des secteurs où aucune mesure de flux dissous n'a été effectuée.

C) Applications des modélisations

Les modèles précédemment exposés ont été établis à partir de données locales (bassins versants de Draix) et recouvrant deux décennies environ.

Le but de cette partie est de présenter deux exemples d'application de ces modèles :

- une première en élargissant la fenêtre temporelle (évolution des flux sur deux siècles) ;
- une deuxième en élargissant la fenêtre spatiale (estimation des flux à l'échelle régionale).

C-1) Evolution des flux de COF depuis 200 ans

C-1-1) Evolution des facteurs contrôlant

La modélisation des flux de COF issus des bassins versants de Draix sur les deux derniers siècles nécessite la connaissance de l'évolution des paramètres taux de terrain nu, pente et précipitations de ces bassins sur la même période. Nous les avons obtenus de la façon suivante :

- **Le taux de terrain nu** : D'importantes séries d'inondations catastrophiques ont eu lieu dans le Sud Est de la France au cours du XIX^{ème} siècle (figure V-33). Celles-ci étant liées à la faible densité du couvert végétal existant à l'époque dans la région, d'importants travaux de reboisements (Pin noir d'Autriche) furent entrepris à la fin de ce siècle à travers le programme national de «Restauration des Terrains de Montagne» (RTM) (Combes *et al*, 1995 ; Vallauri, 1997 ; Pichard, 2001 ; Chauvin, 2002) (tableau V-15).

Taux de boisement	1770-1780 (1)	1798 (2)	1989 (3)
Alpes de Haute Provence	10 % environ	17,7 %	42,8 %
Hautes Alpes	11 % environ	17%	28,4 %
Drôme	14 % environ		40,1 %

Tableau V-15 : Evolution du taux de boisement depuis deux siècles dans les Alpes-de-Haute-Provence, les Hautes-Alpes et la Drôme (sources : 1. d'après les cartes de Cassini ; 2. d'après les cadastres, dans Demontzey, 1878 ; 3. d'après I.F.N. 1989) (Vallauri, 1997).



Figure V-33: Dépôt de matériaux issus de l'érosion des badlands après inondation à Angle (ravin du petit Riou, mai 1889, Archives ONF / RTM, Léonard, 2004).

Les taux de terrain végétalisé des bassins de Draix ont donc évolué en conséquence (Vallauri, 1997) :

- le bassin du Brusquet a été reboisé dès 1870. Le taux de boisement, de 8 % en 1870 a rapidement augmenté pour atteindre 84% en 1900. Il apparaît comme stable jusqu'en 1948 pour ensuite augmenter progressivement jusqu'au taux de terrain végétalisé actuel (87%) (figures V-34 et 35) ;
- le bassin du Laval n'a pas subi de travaux de reboisement. Le taux de boisement, de 3% seulement durant le XIX^{ème} siècle, n'a augmenté qu'à partir de 1900, suite à la déprise rurale, pour atteindre le taux de terrain végétalisé actuel (32%).

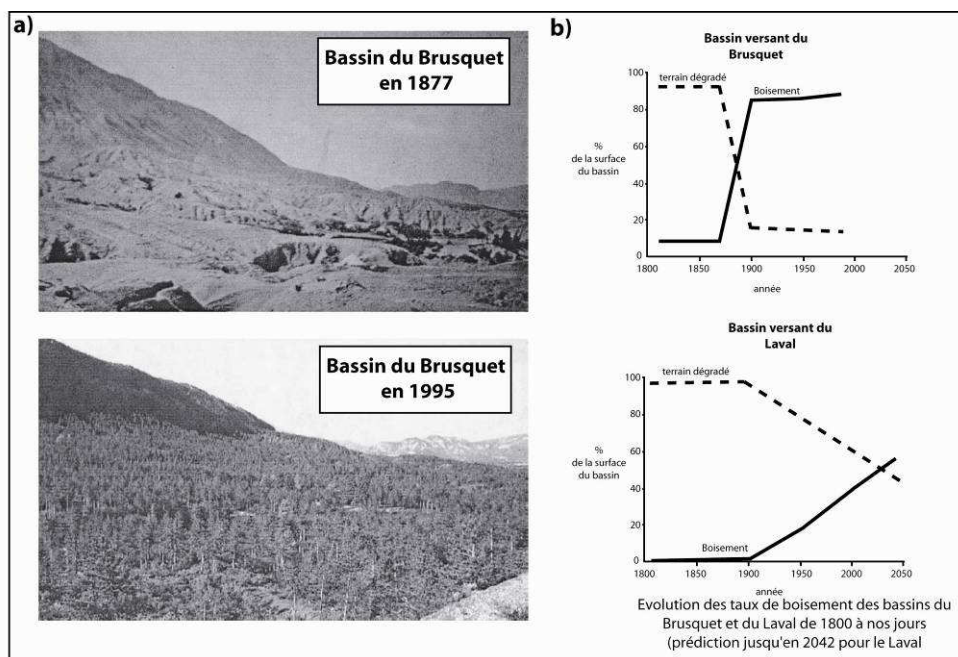


Figure V-34: Evolution du taux de boisement des bassins versant du Brusquet et du Laval
a) photos du Brusquet en 1877 et en 1995 (Chauvin, 2002)
b) évolution du taux de boisement du Laval et du Brusquet depuis deux siècles (Vallauri, 1997).

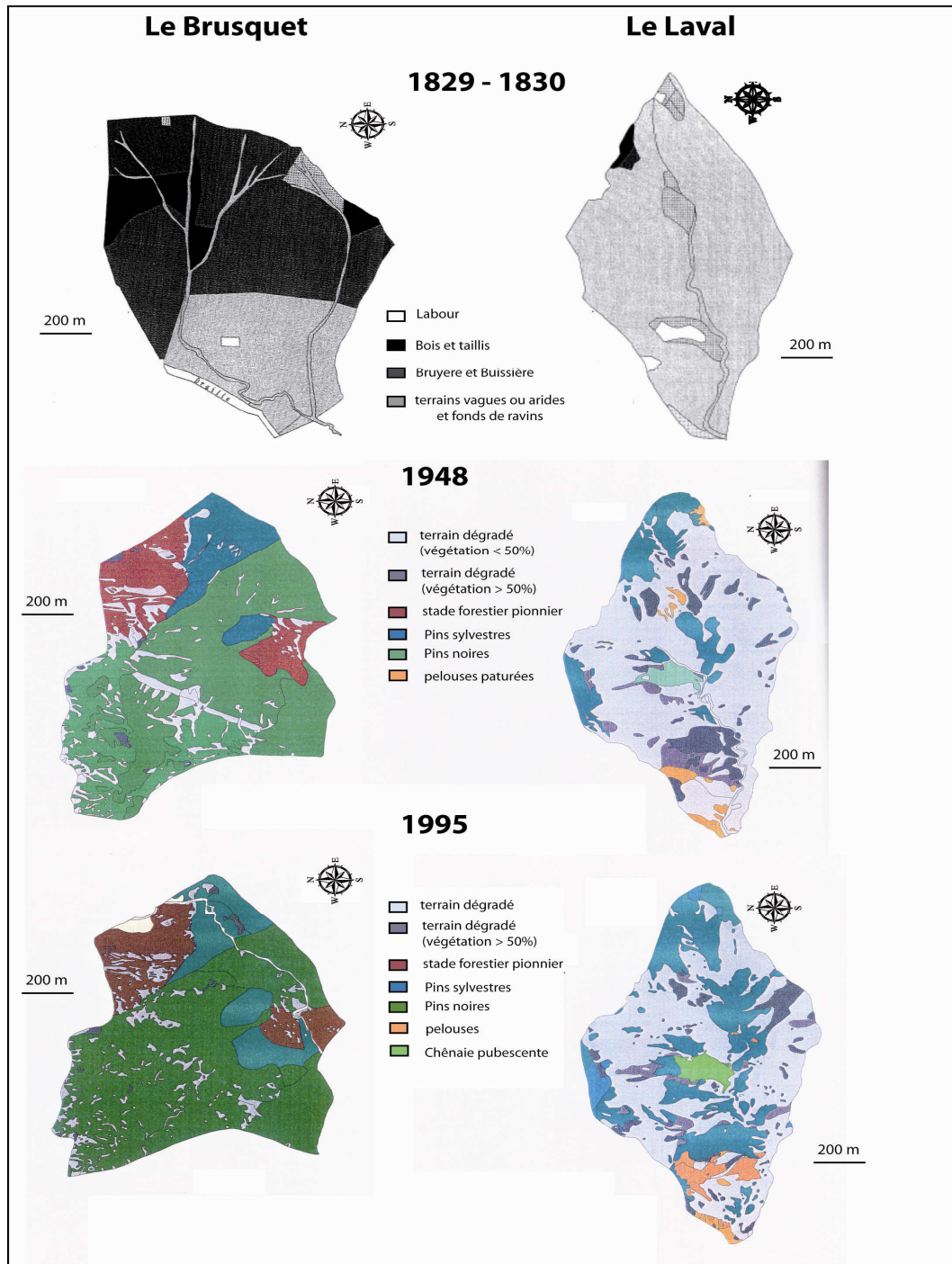


Figure V-35 : Cartes de végétations des bassins du Laval et du Brusquet en 1830, 1948 et en 1995 (d'après Vallauri, 1997 a et b).

- **La pente** : Les quelques mécanismes susceptibles de faire évoluer la pente de façon significative sont la tectonique et l'érosion. Bien que l'érosion soit importante sur le secteur, nous considérons, au vu de la figure V-34-a, que la pente moyenne des bassins de Draix est inchangée depuis le XIX^{ème} siècle.

- **Les précipitations** : ne disposant d'aucunes données sur le site, nous avons estimé les hauteurs annuelles des précipitations sur le site de Draix depuis 1800 de la façon suivante :

- Les précipitations annuelles moyennes du site de Draix¹⁰¹ ont été comparées avec celles mesurées à Marignane (Bouches du Rhône) sur la période 1984 - 2002 (figure V-36-a). Nous remarquons : -1) qu'elles évoluent parallèlement, entre 631 et 1132 mm (Draix) et entre 261 et 814 mm (Marignane) ; et -2) que les hauteurs d'eau relevées à Draix sont plus fortes que celles relevées à Marignane (entre 213 et 714 mm pour une moyenne de 375 mm).

Ce parallélisme des valeurs, ainsi que le décalage remarqué entre les deux sites, nous a permis de proposer des valeurs de précipitations sur Draix pour les deux derniers siècles (1800-1987). Celles-ci, calculées en ajoutant 375 mm aux précipitations relevées à Marseille (Miramont, 1998), oscillent entre 602 mm (1967) et 1445 mm (1972) pour une moyenne interannuelle de 940 mm.

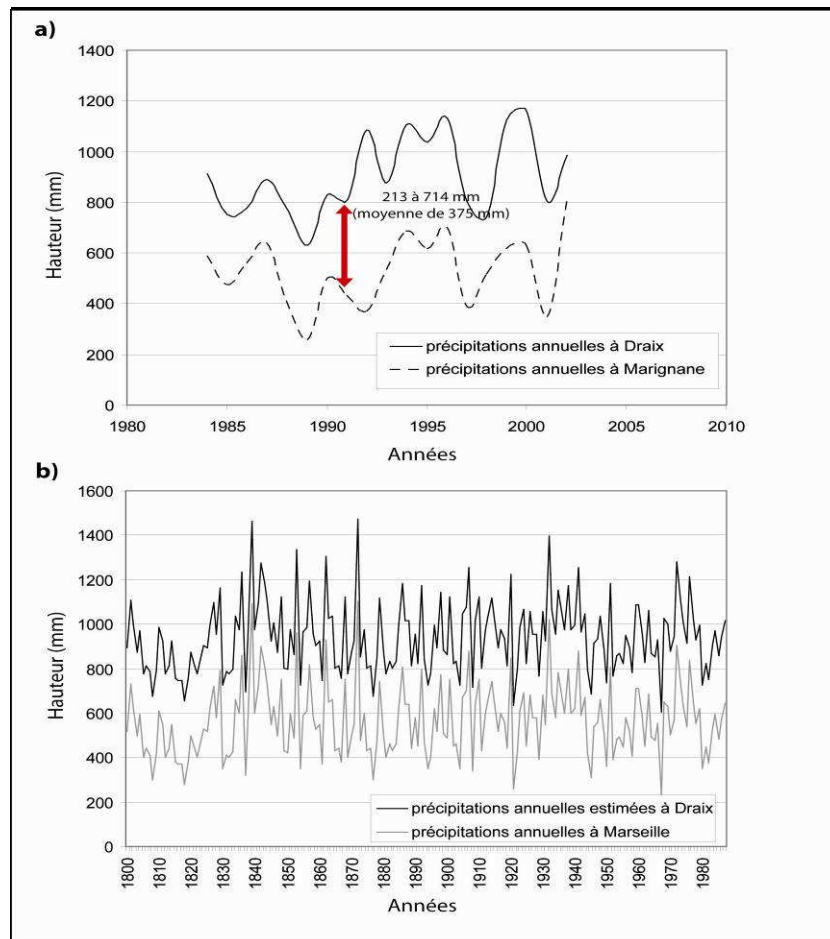


Figure V-36 : Estimation des précipitations annuelles moyennes pour le site de Draix (1800-1987) :
 a) comparaison des précipitations mesurées à Draix et à Marignane (1984-2002) ;
 b) estimation des précipitations annuelles moyennes pour le site de Draix à partir des précipitations mesurées à Marseille (1800-1987).

¹⁰¹ Nous avons moyenné, lorsque possible, les hauteurs de précipitations annuelles de l'ensemble des pluviographes installés sur les bassins versants (Laval, Sévigné, Pompe, Pépinière et Blache).

C-1-2) Evolution des FmCOF

L'utilisation des modèles MmL, MmNV1 et MmNV2 permet l'obtention de chroniques de FmCOF annuels sur les deux derniers siècles (figure V-37) et des tonnages cumulés de COF libéré sur la même période (figure V-38). Au vu des nombreuses incertitudes concernant les valeurs des facteurs Tn, Pt et Pre, les commentaires sur leurs évolutions respectives se limiteront à l'examen des grandes tendances.

Le bassin du Laval : Nous remarquons une certaine stabilité des valeurs de FmCOF sur la période 1800 – 1900. Les valeurs moyennes oscillent autour de 0,78 t/ha/an (MmL), 0,66 t/ha/an (MmNV1) et 0,78 t/ha/an (MmNV2). Elles diminuent ensuite sensiblement à partir 1900 pour atteindre les moyennes actuelles (0,54 , 0,56 et 0,53 t/ha/an par les modèles MmL, MmNV1 et MmNV2).

Les résultats suggèrent que l'érosion mécanique du bassin du Laval s'est traduite par une très forte libération de COF dans les eaux de la Bléone (figure V-38). Les tonnages cumulés atteignent en effet des valeurs comprises entre 10950 et 12865 t (MmNV1 et MmL) en seulement 200 ans.

Le bassin du Brusquet : Nous remarquons une certaine stabilité des valeurs de FmCOF sur la période 1800 - 1870. Les valeurs moyennes oscillent autour de 0,74 t/ha/an (MmL), 0,58 t/ha/an (MmNV1) et 0,72 t/ha/an (MmNV2). Elles chutent ensuite très rapidement à partir de 1870 (boisement du bassin versant), pour se stabiliser vers 1900 autours des valeurs extrêmement faibles prévalant encore aujourd'hui (0,005 , 0,05 et 0,016 t/ha/an selon les modèles MmL, MmNV1 et MmNV2).

Il en résulte que l'essentiel du COF libéré par l'altération mécanique de ce bassin depuis 1800 (de 6300 à 7580 t par modélisation MmNV1 et MmL, figure V-38) l'a été avant 1890 environ.

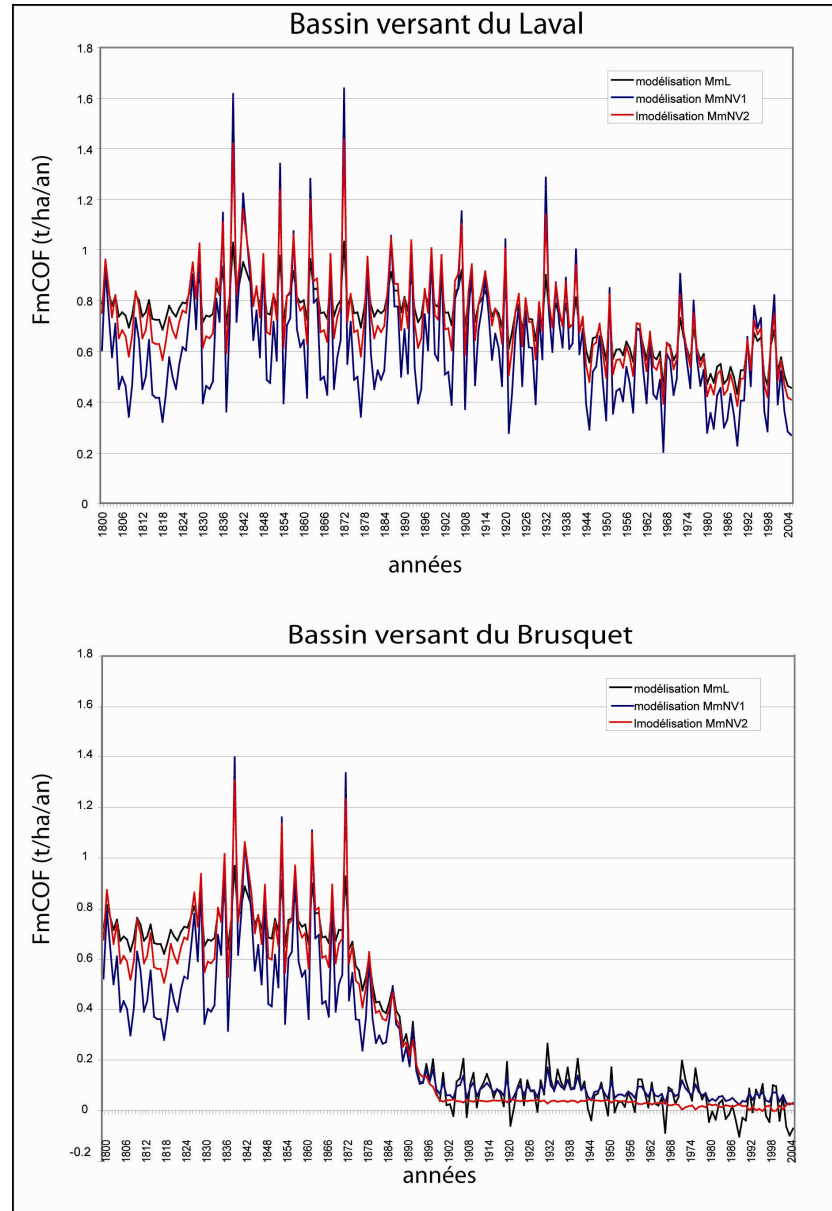


Figure V-37 : Evolution des FmCOF des bassins du Laval et du Brusquet au cours des deux derniers siècles selon les modèles MmL, MmNV1 et MmNV2.

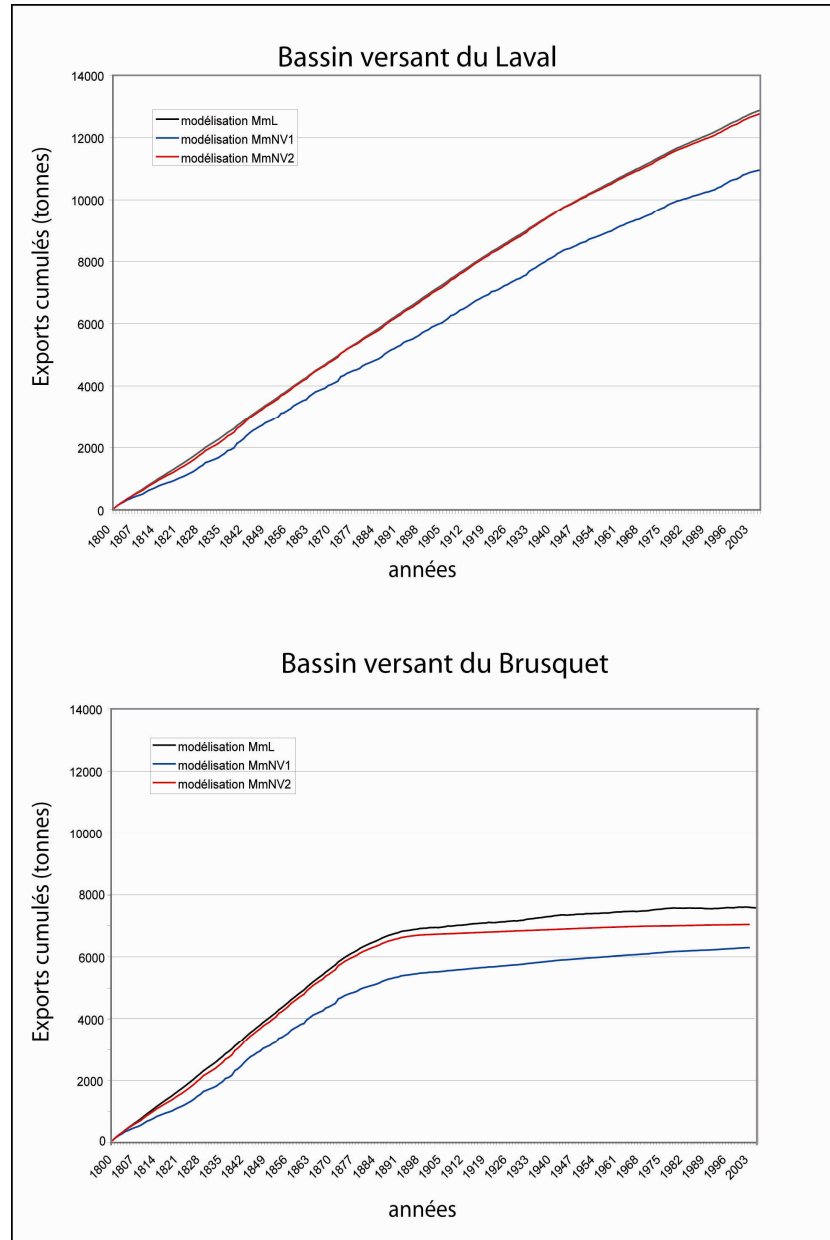


Figure V-38 : Tonnages de COF libéré par l'altération mécanique des roches et exporté par les rivières depuis 1800 (bassins du Laval et du Brusquet).

C-1-3) Evolution des FcCOF

L'utilisation des modèles McL2, McNV1 et MvNV2 a autorisé l'obtention de chroniques de FcCOF annuels pour les deux derniers siècles (figure V-39) et des tonnages cumulés de COF libéré sur la même période (figure V-40). Les commentaires sur leurs évolutions respectives se limiteront à nouveau à l'examen des grandes tendances.

Le bassin du Laval : Les FcCOF obtenus diffèrent sensiblement d'un modèle à un autre¹⁰² (figure V-39). Nous retiendrons essentiellement le fait que les valeurs moyennes sont extrêmement faibles (inférieures à 0,02 t/ha/an) tous modèles confondus.

Ceci se traduit par des flux cumulés ne dépassant 275 t (modèle McNV1) pour l'ensemble de la période étudiée (figure V-40).

Le bassin du Brusquet : Ici encore, nous remarquons une très forte variabilité des FcCOF obtenus en fonction du type de modélisation (figure V-39). Se dégage cependant une augmentation significative et brutale des valeurs entre 1870 et 1900, relevée notamment par les modèles McNV1 et MCL2. Les FcCOF moyens évoluent entre 0 et 0,02 t/ha/an avant 1870, et entre 0,02 à 0,08 t/ha/an après 1900.

Le flux cumulé de COF est en conséquence plus important que pour le bassin du Laval. 475 à 1040 t de COF ont pu ainsi être libérées par l'altération chimique des roches durant les deux derniers siècles (l'essentiel vraisemblablement depuis 1900).

¹⁰² Les réponses des différents modèles apparaissent contrastés selon les poids accordés aux facteurs T_n et P_t , mais aussi selon l'importance des $FcCOF_v$ et $FcCOF_n$ (McNV 1 et 2).

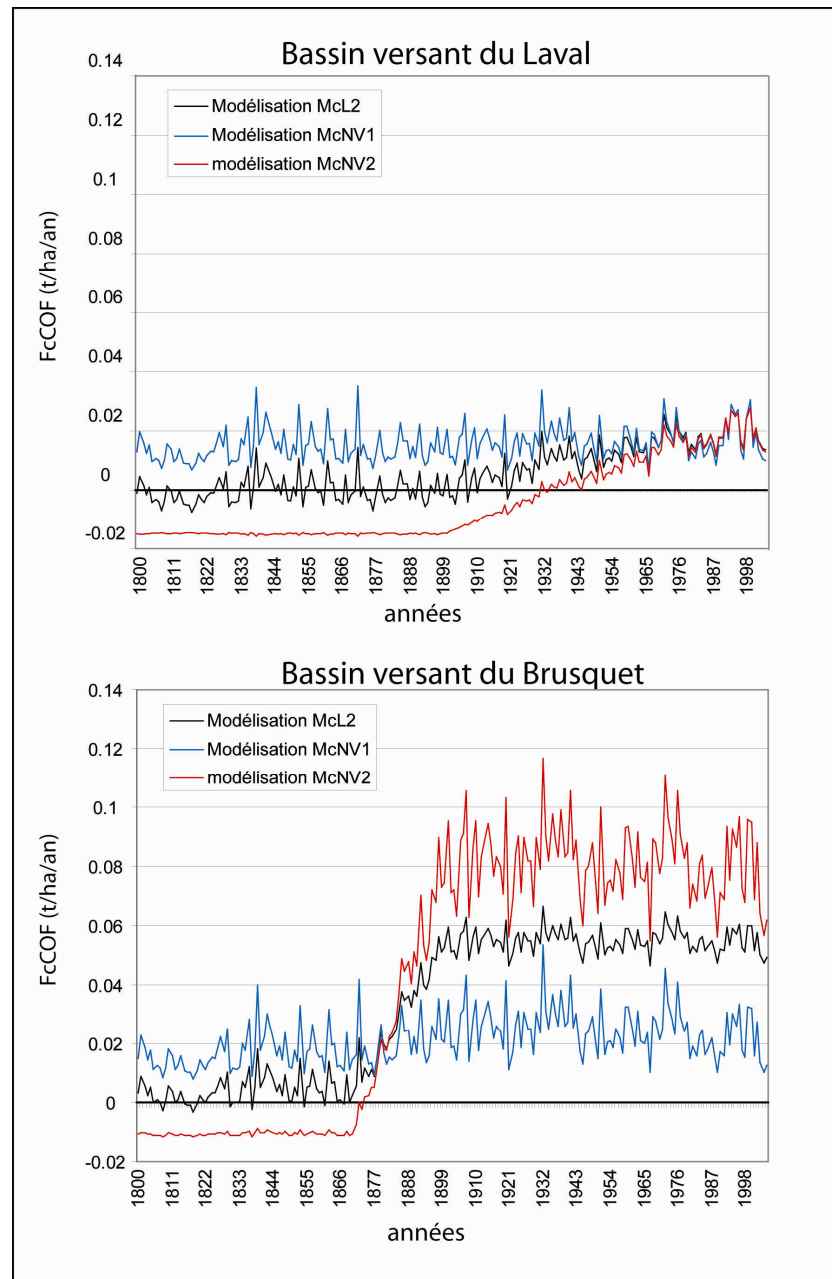


Figure V-39 : Evolution des FcCOF des bassins du Laval et du Brusquet au cours des deux derniers siècles selon les modèles McL2, McNV1 et McNV2.

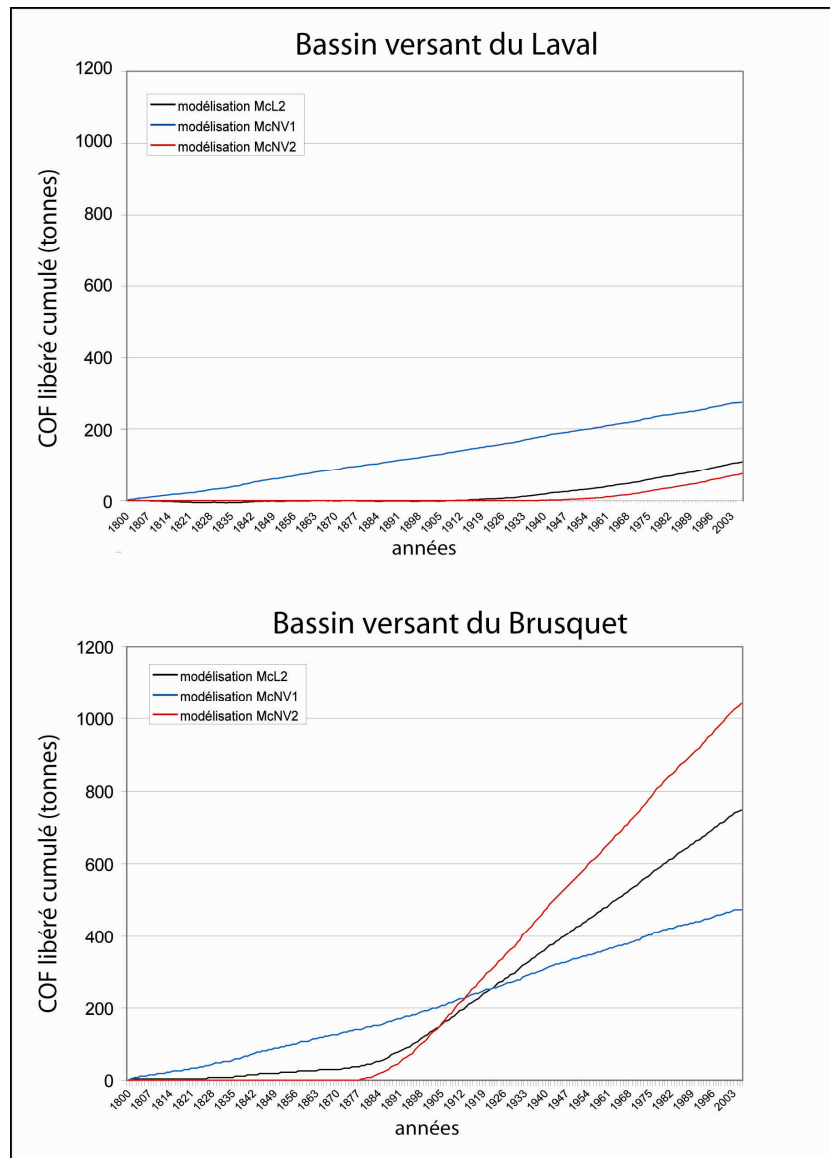


Figure V-40: Tonnages de COF libéré par l'altération chimique des roches depuis 1800 (bassins du Laval et du Brusquet).

C-1-4) Impact de l'anthropisation sur l'évolution des flux de COF

La comparaison des chroniques de FmCOF et FcCOF sur les deux derniers siècles montre que le principal facteur ayant contrôlé leurs évolutions sur le bassin du Brusquet est la reforestation engagée entre 1870 et 1900.

Cette reforestation, impliquant une augmentation de l'infiltration et une diminution du ruissellement, s'est traduite par :

- un équilibrage brutal des processus érosifs (mécaniques et chimiques) et des flux en découlant (figure V-41). Ceci s'observe notamment par une forte chute des rapports FmCOF / FcCOF, passant de valeurs très fortes (de 46 selon les modélisations MmNV2 et McNV1 à 180 selon les modélisations MmNV2 et McL2¹⁰³) à très faible (de 1,1 selon les modélisations MmNV2 et McNV1 à 0,4 selon les modélisations MmNV2 et McL2) ;

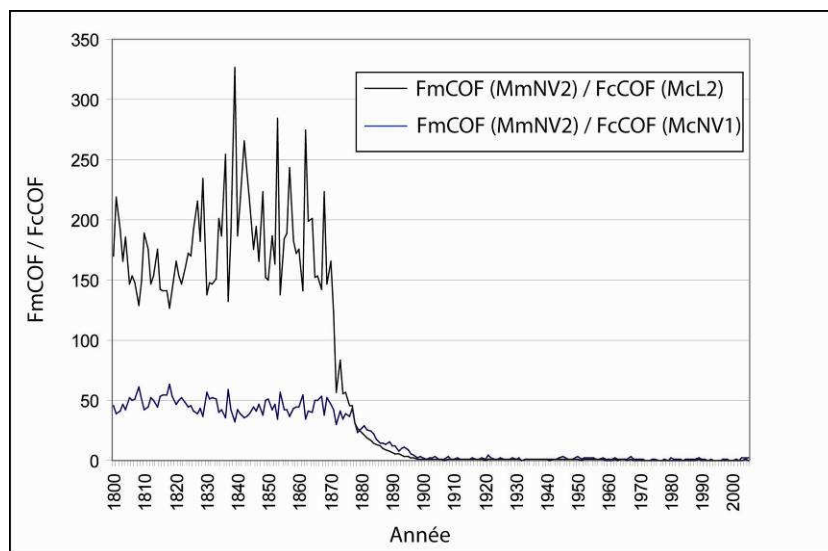


Figure V-41: Evolution du rapport FmCOF / FcCOF de 1800 à nos jours.

- une diminution des flux de COF dans les eaux. Le manque lié à l'anthropisation peut être estimé entre 7450 t (MmNV1) et 8900 t (MmL) pour la période écoulée (figure V-42) ;

- une augmentation possible des FcCOF libérés par l'altération chimique des roches. La très grande incertitude des résultats obtenus selon les divers modèles¹⁰⁴ n'autorise pas une

¹⁰³ Nous avons utilisé le FcCOF moyen de 0,004 t/ha/an (modélisation McL2) pour la période 1800-1870.

¹⁰⁴ Ce point témoigne de la nécessité d'une calibration plus précise des modèles de FcCOF.

estimation précise de cette augmentation. Elle pourrait être à l'origine d'une libération de COF cumulé de 1000 t au maximum (figure V-43).

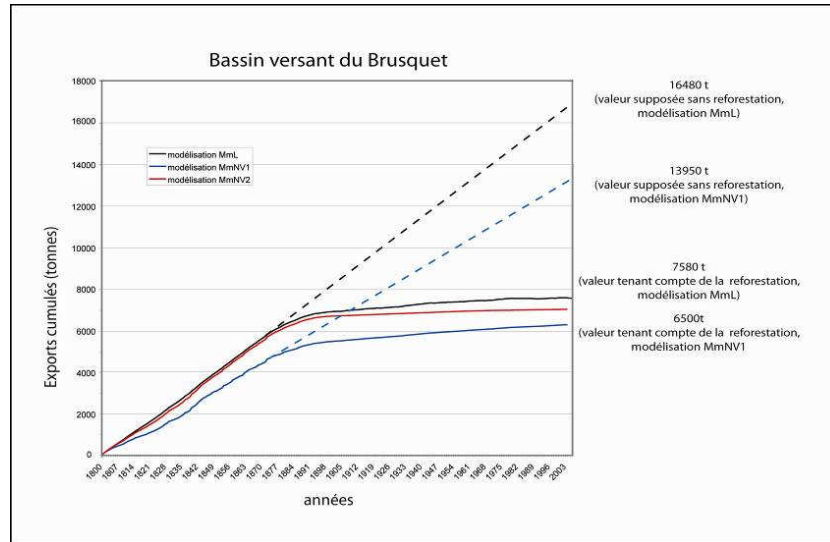


Figure V-42: Quantification des exports de COF retenus en relation avec la reforestation (1970 - 1890), bassin du Brusquet.

Les manques liés au reboisement sont estimés en soustrayant aux valeurs supposées sans reforestation les valeurs tenant compte de cette dernière. Ils atteignent 7450 t (MmNV1) et 8900 t (MmL).

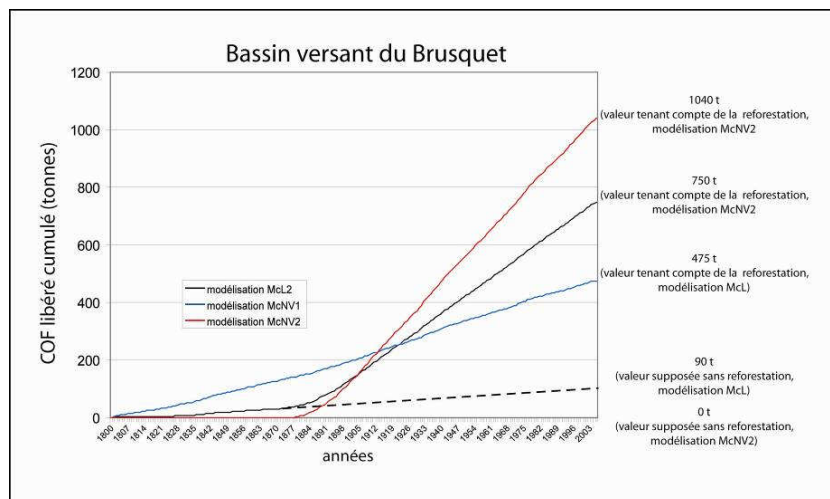


Figure V-43: Quantification du COF libéré par l'altération chimique des roches en relation avec la reforestation (1970 - 1890), bassin du Brusquet.

Les surplus liés au reboisement sont estimés en soustrayant aux valeurs tenant compte de la reforestation les valeurs supposées sans reforestation. Ils atteignent 1000 t au maximum.

C-2) Les flux de COF à l'échelle régionale

Les flux de COF libéré par l'altération mécanique des « terres noires » ayant été calculés à l'échelle des bassins de Draix (échelle locale), il nous a paru intéressant de tenter de les estimer à l'échelle du bassin versant de la Durance (échelle régionale).

Deux estimations, complémentaires et indépendantes, ont donc été envisagées :

- la première (approche amont) est obtenue en appliquant à l'ensemble des terres noires du bassin de la Durance les FmCOF modélisés sur les bassins de Draix.
- la seconde (approche aval) est conduite à partir des données issues de la littérature sur les flux de matériel fluvial solide mesurés aux exutoires de la Durance et du Rhône.

C-2-1) Approche « amont »

Rey *et al* (2007) ont proposé une carte croisant données lithologiques (terres noires, autres marnes) et couvert végétal (terrain non végétalisé et couvert végétal hétérogène) pour l'ensemble du bassin de la moyenne Durance (figure V-44). Il en ressort que les terres noires érodées affleurent sur 23268 ha (4106 ha sans couvert végétal et 19162 ha avec couvert végétal hétérogène).

L'attribution aux terrains nus et aux terrains à couvert végétaux hétérogènes¹⁰⁵ de FmCOF moyens de 0,8 t/ha/an¹⁰⁶ et 0,6 t/ha/an¹⁰⁷ nous permet d'estimer un flux annuel de COF libéré par l'altération mécanique des terres noires atteignant 14782 t/an (dont 3284,8 issus des terrains sans couvert végétal, et 11497,2 issus des zones érodées à couvert végétal hétérogène).

¹⁰⁵ Selon Descroix (1998), l'altération des terres noires du bassin de la Durance reste du même l'ordre de grandeur sur l'ensemble des terrains dégradés

¹⁰⁶ Il s'agit du FmCOFn moyen modélisé par MmNV2 pour les bassins de Draix. Nous rappelons que ce modèle nous est apparu comme le plus crédible (cf. § V-B- 2-1-3).

¹⁰⁷ Il s'agit du FmCOF moyen du bassin du Laval. Nous avons retenu ce bassin car il possède des caractéristiques intermédiaires par rapport aux bassins du Moulin et de la Roubine, tous situés sur des terrains considérés comme possédant un couvert végétal hétérogène.

Sachant que selon Mathys (2006), le rapport MES / CF des cours d'eau augmente avec la taille du bassin versant¹⁰⁸ sur le secteur étudié, il nous est permis de penser qu'une grande majorité du COF sera exporté au sein des MES à l'échelle du bassin de la Durance.

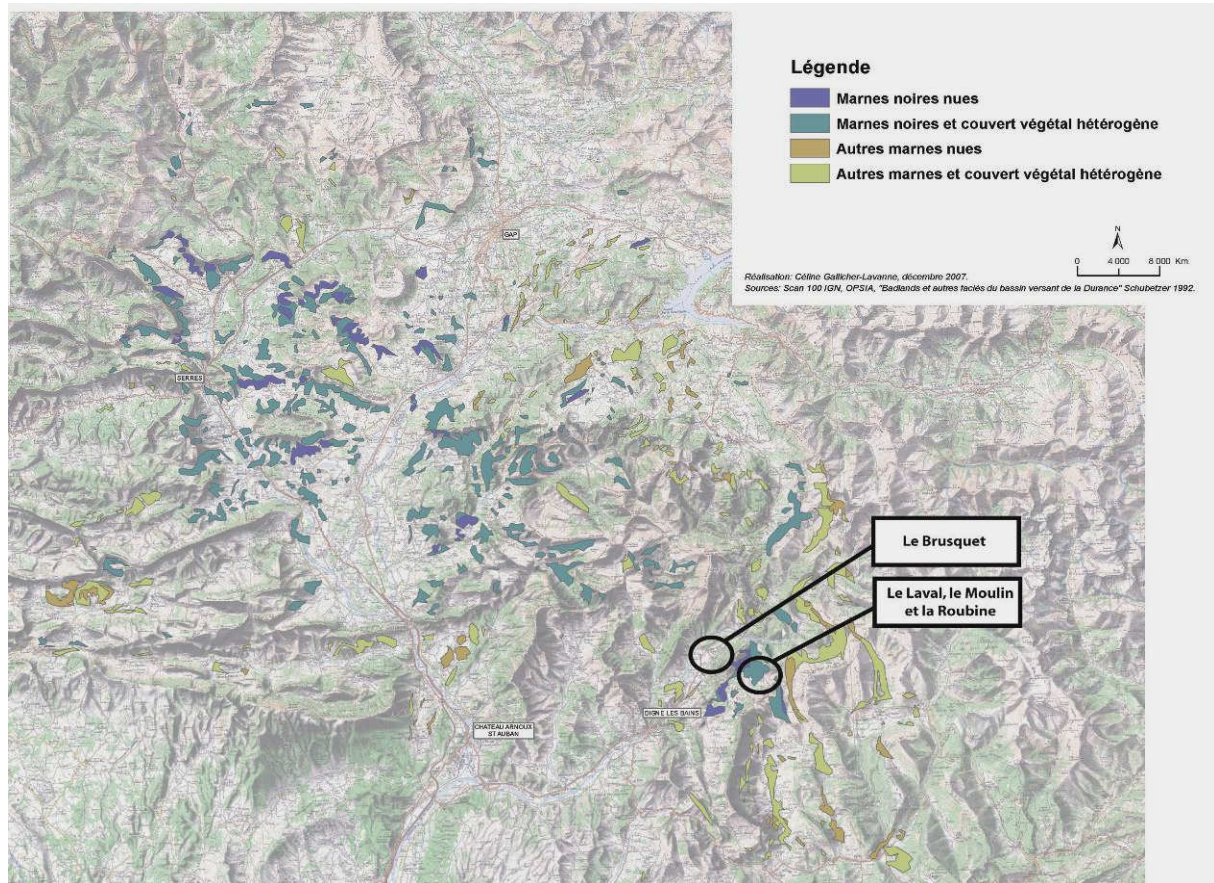


Figure V-44: Carte des terrains marneux érodés du bassin versant de la Durance (Rey et al, 2007).

C-2-2) Approche « aval »

Le cours de la Durance est caractérisé par la présence de nombreux ouvrages (barrages et canaux, cf. figure II-1) générant des perturbations dans le transit des particules fluviales (retenue des charges de fonds notamment). Notre approche se fonde donc sur les données de la littérature estimées en régime naturel (contexte non anthropisé). Celles-ci montrent que l'essentiel des particules fluviales transite sous forme de MES. Les flux de MES estimés atteignent en effet 4000000 voire 6000000 t/an, tandis que ceux de CF ne dépassent pas 500000 t/an (IRS, 2001 ; Bertier et Bouchard, 2007).

¹⁰⁸ Ce rapport est de l'ordre de 20 % pour la Roubine (0,13 ha), de 50 % pour le Moulin (8 ha) et de 70 % pour le Laval (86 ha).

Environ 80% de ces MES seraient issus de l'altération mécanique des terres noires (Fournier, 2004), ce qui représente un flux de 3200000 à 4800000 t/an. Si nous attribuons à ces MES le COT (%) moyen des terres noires établi par Artru (1972) sur 6000 échantillon du bassin du Sud Est de la France (0,5%), nous pouvons proposer un flux de COF atteignant 16000 voire 24000 t/an.

C-2-3) Les flux de COF issus de l'érosion des terres noires à l'échelle régionale

C-2-3-1) Confrontation des approches « amont » et « aval »

La similarité entre les flux estimés à partir des modélisations d'érosion des terres noires (14782 t/an, approche amont) et ceux estimés à partir des données de la littérature sur les particules fluviales de la Durance (16000 à 24000 t/an approche aval) apparaît significative. Ceci valide les FmCOF estimés à partir des bassins de Draix, et confirme leur extrapolation possible à plus grande échelle.

C-2-3-2) Importance des flux de COF issus de l'érosion des terres noires à l'échelle du bassin versant du Rhône

Nous l'avons vu, une part importante du flux de matériel solide transporté par la Durance est retenue par les différents ouvrages hydroélectriques présents sur son cours, ou détournée par le biais de canaux vers l'étang de Berre notamment. Selon les estimations, les flux de MES actuels évoluent entre 1800000 et 3000000 t/an (IRS, 2001 ; Bertier et Bouchard, 2007), ce qui représente, potentiellement, de 7200 à 12000 t/an de COF.

Ludwig (1996) a estimé le flux total de COP à l'estuaire du Rhône à 44080 t/an environ. Nos résultats suggèrent donc que 16 à 27 % de ce flux pourraient être constitués du COF libéré par l'altération mécanique des terres noires¹⁰⁹, bien que ces zones érodées (23268 ha) ne représentent que 0,24 % de la surface du bassin versant du Rhône.

¹⁰⁹ La vitesse de transit des MES est estimée à 100km / jours (IRS, 2001). De fait, le faible temps de transport du COF depuis le bassin versant jusqu'à l'estuaire du Rhône (400 km maximum) laisse penser que son altération sera extrêmement faible, voire nulle (cf. § IV-C).

L'étude (palynofacies quantitatif et mesure des pouvoir réflecteur) d'un échantillon de MES prélevé dans le Rhône à Arles (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire de Cadarache) appuie cette hypothèse.

La matière organique de cet échantillon apparaît très hétérogène (figures V-45 et 46), mais nous distinguons en son sein une population récente (MOAgc, LC, éléments figurés et AG), et une population fossile identique à celle observée dans les marnes de Draix (LCO¹¹⁰, MOAR, MOAO et DG). Cette population fossile représente 25 % environ de la masse totale de MO. Elle est accompagnée de nombreuses particules de pyrite rhomboïdales qui suggèrent, compte tenu de leur extrême labilité (cf. § IV-B et C), un temps de transport court.

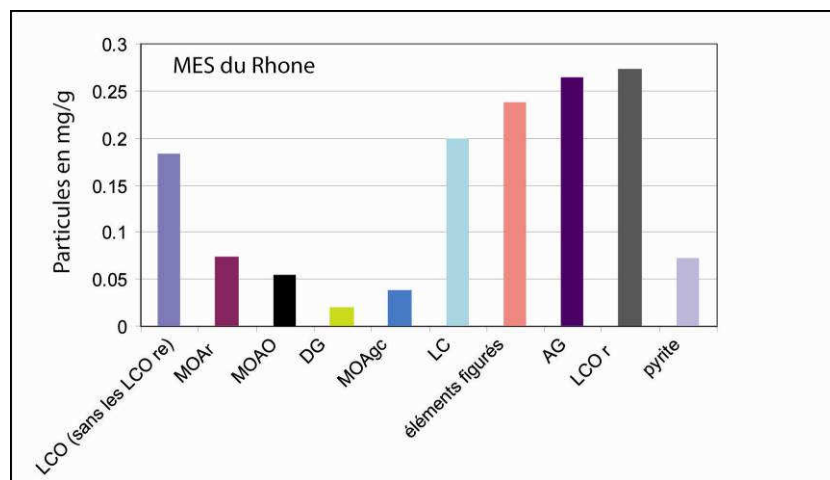


Figure V-45: Palynofacies quantitatif de l'échantillon de MES du Rhône prélevé à Arles en Juin 2008.

LCO : débris ligneux-cellulosiques opaques ; MOAr : matières organiques amorphes rougeâtres ; MOAO : matières organiques amorphes opaques ; DG : débris gélifié ; MOAgc : matières organiques amorphes granulaires claires ; LC : débris ligno-cellulosiques ; élément figurés : somme des mycéliums, membranes, spores et pollens ; AG : amorphes gélifiées, LCO r : débris ligneux-cellulosiques opaques présentant un éclat brillant en lumière réfléchie

¹¹⁰ Compte tenu de la confusion possible entre les LCO r (particules opaques fortement réfléchissantes) avec des résidus de combustion d'origine anthropique, nous avons quantifié ces particules à part.

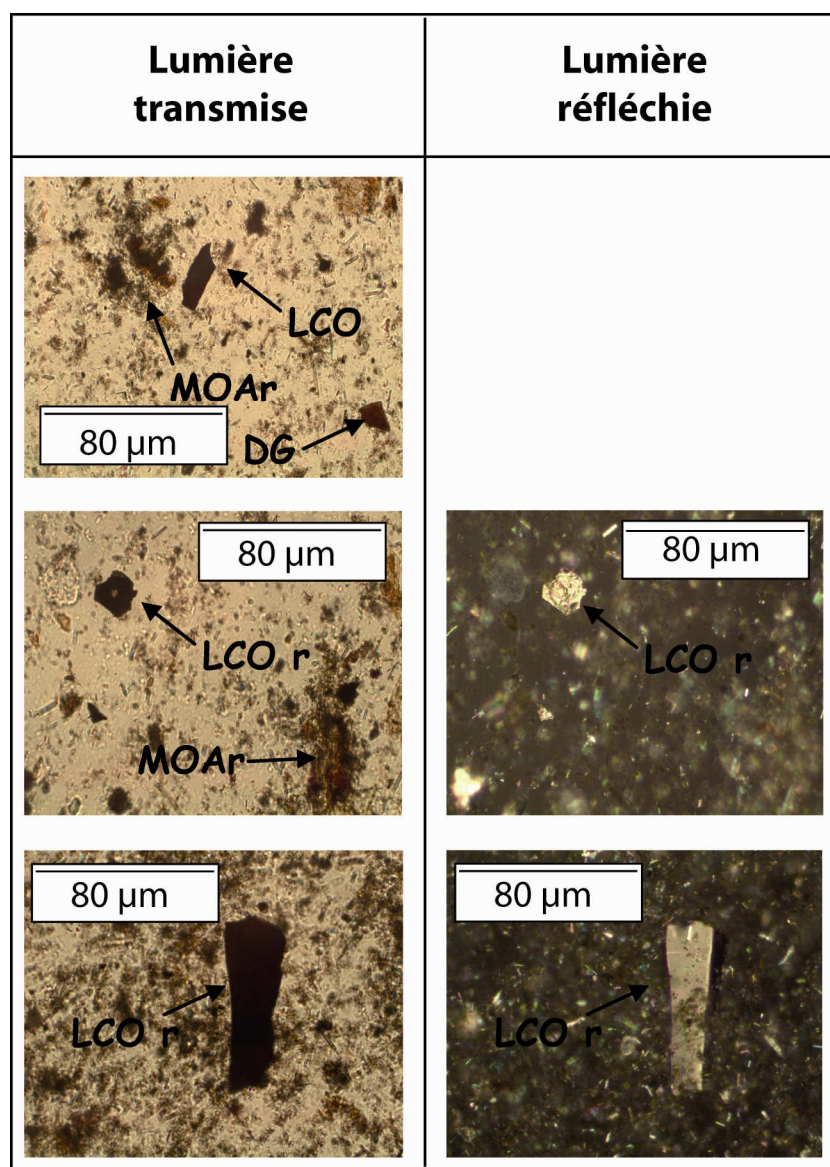


Figure V-46: Quelques exemples de particules organiques observées dans l'échantillon de MES du Rhône prélevé à Arles en Juin 2008.

LCO : débris ligneux-cellulosiques opaques ; *MOAr* : matières organiques amorphes rougeâtres ;

DG : débris gélifié ; *AG* : amorphes gélifiées, *LCO r* : débris ligneux-cellulosiques opaques présentant un éclat brillant en lumière réfléchie

Enfin, les morphologies, dimensions (figure V-47-b) et pouvoirs réflecteurs (figure V-47-a) des particules réfléchissantes observées dans cet échantillon sont en tous points comparables à celles contenues dans les marnes de Draix (figure V-47-c et d).

Gadel et Ragot (1973) avaient déjà considéré que des particules de type vitrinite, retrouvées dans les sédiments du Rhône, pouvaient être d'origine fossile.

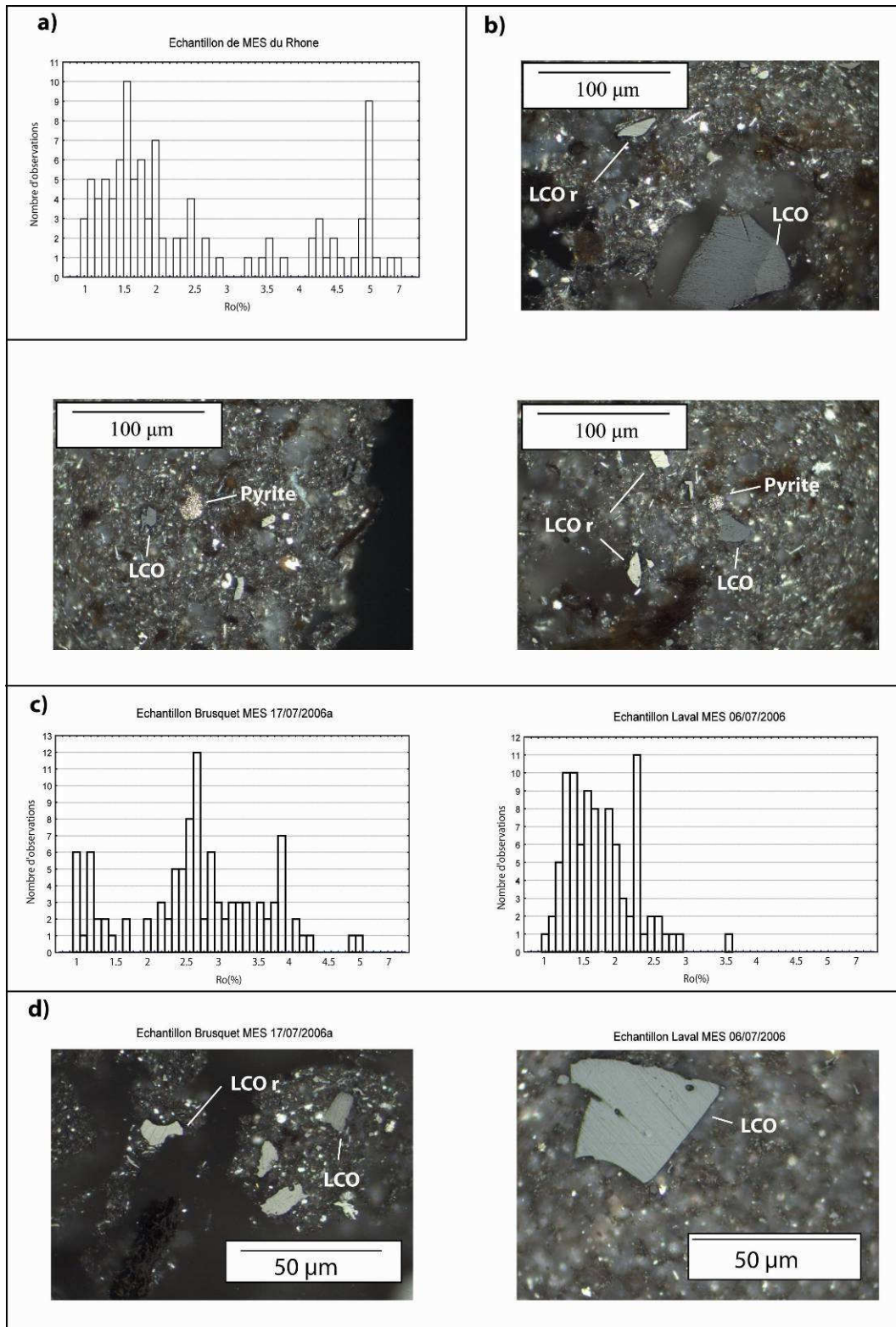


Figure V-47: Comparaison des observations effectuées sur l'échantillon de MES du Rhône) et sur ceux de Draix
 a) mesure des pouvoirs réflecteurs (échantillon de MES du Rhône) ;
 b) quelques exemples de particules observées (échantillon de MES du Rhône) ;
 c) rappels des pouvoirs réflecteurs mesurés dans les MES de Draix (Brusquet et Laval) ;
 d) rappels des particules observées dans les MES de Draix (Brusquet et Laval).
 LCO : débris ligneux-cellulosiques opaques ;
 LCO r : débris ligneux-cellulosiques opaques présentant un éclat brillant en lumière réfléchie.

C-2-4) Prise en compte des autres types de marnes

du bassin de la Durance générant des morphologies de type badlands

Les terres noires callovo-oxfordiennes ne sont pas les seules formations géologiques susceptibles d'engendrer des morphologies de type badlands. S'y ajoutent en effet les marnes grises du Valanginien et les marnes bleues de l'Apto-Albien (figure V-48).

Bien que celles-ci ne possèdent pas des puissances comparables à celle des terres noires (terres noires : 2000 mètres, marnes grises : 60 à 80 mètres et marnes bleues : 250 à 300 mètres, Descroix, 1998), l'importance de leur surface d'affleurement au sein du bassin de la Durance incite à leur prise en compte (15542 ha de terrain érodé, dont 3591 ha de terrain non végétalisé et 11951 ha sous couvert végétal hétérogène) (figure V-45). Ceci est renforcé par les résultats présentés par Descroix (1998), qui montrent que le comportement des marnes bleues de l'Apto-Albien face à l'altération mécanique est proche de celui des terres noires (tableau V-16). Les ablations moyennes des marnes valanginiennes et apto-albiennes atteignent, en effet, les valeurs de 0,95 cm/an sur les adrets comparables à l'ablation observée sur les terres noires (0,85 en moyenne et 0,45 sur les adrets).

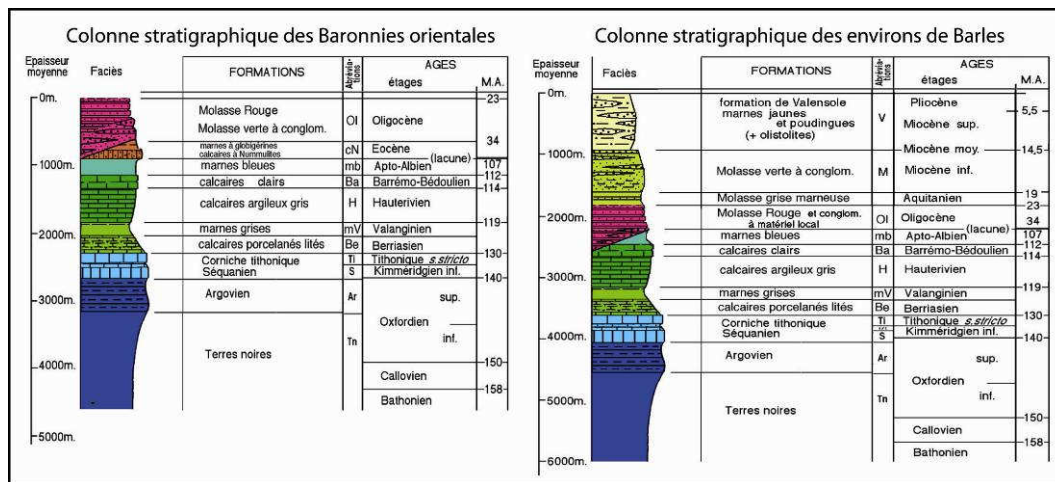


Figure V-48: Exemples de colonnes stratigraphiques du Sud-Est de la France (source geol-alp.com).

	Marnes noires	Marnes bleues
Site	Bar., PdB	Bar., Diois
Durée du suivi	6-8 ans	2 ans
Procédé	règle, piège	règle, piège
Ablation moyenne (cm/an)	0,85	
Ablation sur adret (cm/an)	0,45	0,95
Ablation sur ubac (cm/an)	1,25	

Tableau V-16 : Ablation sur les principaux terrains tendres des Préalpes du sud (Descroix, 1998):

- Site : Bar. = Baronnie, PdB = pays du Buëch ;
- durée : durée de la période d'observations ;
- procédés : règle = règle topographique ; piège = piège à sédiments.

Nous ne possédons malheureusement que très peu d'informations concernant le COT (%) de ces formations¹¹¹, et nous ne pouvons, pour l'heure, proposer d'estimation crédible de flux de COF issu de leur altération mécanique.

Cependant, si nous appliquons à ces formations les données initiales (COT%), et les flux érodés (FmCOF) identiques à ceux obtenus sur les marnes de Draix, nous obtenons un flux de COF significatif (10043 t/an dont 2873 t issues des terrains non végétalisés et 7170 t des zones à couvert végétal hétérogène) et comparable à celui issu des terres noires. La valeur de ce flux doit bien évidemment être considérée comme un ordre de grandeur, mais elle montre que le COF libéré par l'érosion de ces marnes doit aussi être pris en compte.

¹¹¹ Les COT (%) de ces formations est vraisemblablement significatif. Breheret (1995) montre, en effet, que les valeurs obtenues sur les roches de la série apto-albienne oscillent entre 0,20 et 2,50 % pour les horizons calcaires et marneux et peuvent atteindre 8% dans les niveaux de « black shales ».

C-3) Conclusion

Deux applications des modèles de flux de COF établis à partir des données disponibles sur les bassins de Draix ont été tentées, en élargissant les fenêtres temporelles (deux derniers siècles) et spatiales (échelle régionale).

La première documente l'impact de l'activité anthropique sur l'intensité de l'érosion des badlands du Sud Est de la France. Cet effet est particulièrement visible sur le bassin du Brusquet, où la reforestation initiée en 1870 s'est traduite par une très forte diminution des FmCOF (70 %) dans les cours d'eau entraînant un rééquilibrage des FcCOF et FmCOF.

La deuxième souligne l'importance de la contribution organique issue de l'érosion de terres noires au sein des flux de COP de la Durance et du Rhône. Cette contribution apparaît extrêmement forte (16 à 27 %) en regard de la faible surface occupée par ces formations érodées (terrain non végétalisé et couvert végétal hétérogène) au sein du bassin versant du Rhône (0,24 %).

Notons que cette contribution a pu être beaucoup plus importante par le passé, car si le taux de boisement actuel atteint 42,8 % dans les Alpes de Hautes Provence, il se limitait à 10 % environ dans les années 1770-1780 (Vallauri, 1997, tableau V-15).

D) Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre permettent de conclure sur quatre points.

Le premier point concerne l'importance des flux de COF délivrés par les bassins de Draix.

Ces flux voient la prépondérance de la libération induite par l'érosion mécanique sur celle liée à l'érosion chimique, phénomène il est vrai, peu surprenant en contexte de badlands. Cependant, en dépit de la faible teneur en Corg des formations concernées (0,5 %), les flux de COF atteignent des valeurs exprimables en t / ha / an. Celles obtenues pour les bassins de la Roubine, du Laval et du Moulin varient en effet de 0,300 à 0,680 (FmCOF) et de 0,011 à 0,034 t / ha / an (FcCOF).

Le deuxième point concerne la représentativité des bassins étudiés.

Les flux de COF calculés ou modélisés à partir des études sur les bassins de Draix ont été testés sur les bassins du Saignon et du Savournon. Ils apparaissent de fait performants pour estimer les exports (FmCOF et FcCOF) issus d'autres bassins versants de tailles comparables. Ils semblent aussi être utilisables à l'échelle du bassin versant du Rhône.

Le troisième point concerne les causes de fluctuations de ces flux.

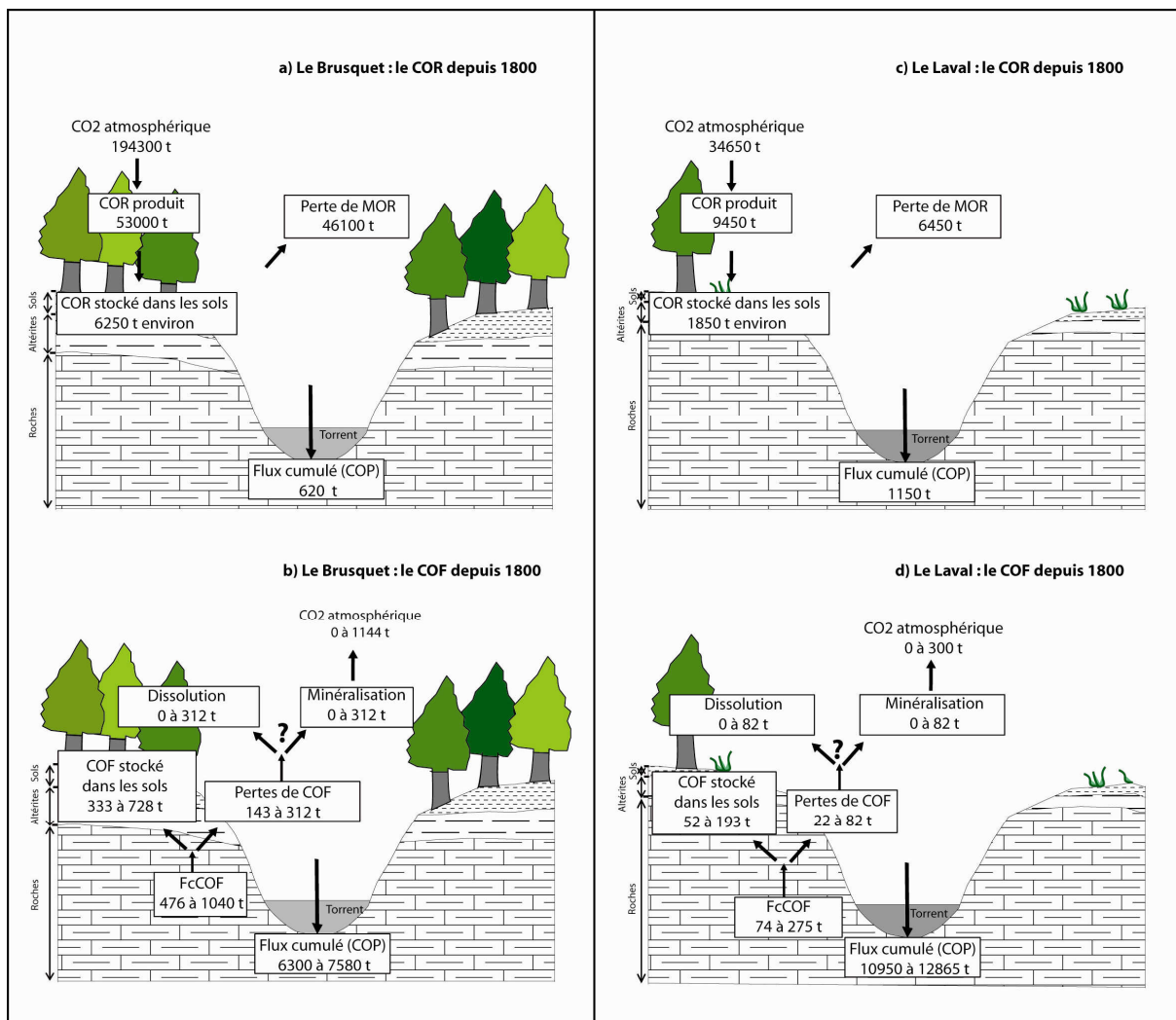
Les flux de COF dépendent bien évidemment de la teneur en Corg des formations altérées, mais sont aussi contrôlés par des paramètres climatiques (précipitations moyennes) et géomorphologiques (taux de terrain non végétalisé et pentes moyennes des bassins versants). Pour les bassins de Draix, l'essentiel de leurs fluctuations sur les deux derniers siècles est lié aux variations du couvert végétal (reforestation). L'activité anthropique s'est localement traduite par une diminution significative des FmCOF (70 %), au profit des FcCOF (bassin du Brusquet).

Le quatrième point concerne la contribution de ces flux dans les COP des cours d'eau

La proportion de COF au sein du COP des cours d'eau drainant les bassins de Draix est majeure (75 à 88 % pour le bassin de Laval – 47 à 91 % bassin du Brusquet). Elle semblerait aussi significative dans le COP véhiculé par les eaux du Rhône. La contribution

des seules terres noires pourrait en effet atteindre 16 à 27 % du COP du fleuve, bien que ces formations ne recouvrent que 0,24 % de son bassin versant.

Synthèse



Où l'on fait le point ...

Les résultats obtenus au terme de ce travail nous permettent de proposer une synthèse que nous développerons autour de trois volets :

- les enseignements sur la MOF délivrée par les terres noires des bassins de Draix ;
- les enseignements extrapolables à d'autres études ;
- les manques et perspectives.

A) Enseignements sur la MOF délivrée par les terres noires des bassins de Draix

Les enseignements acquis sur la MOF contenue dans les formations marneuses de Draix sont multiples. Ils portent en premier lieu sur sa nature et sur la dégradabilité des différentes particules la constituant. Nous les rappellerons donc brièvement avant de proposer des bilans de COF en termes de stocks, stockages et flux à l'échelle des bassins étudiés. Ceux-ci seront ensuite confrontés aux bilans de COR.

A-1) Nature et dégradabilité de la MOF

Les résultats obtenus par pyrolyse Rock-Eval et par palynofacies montrent que la MOF contenue dans les formations marneuses de Draix est un ensemble complexe de populations, le plus souvent d'origine continentale (cf. § III-D-1-1). Cette MO apparaît très mature et semblable à celle observée par Artru (1972) sur l'ensemble des terres noires du sud-est de la France. Elle est principalement composée de trois types de constituants, se distinguant, entre autres, par leurs réactivités respectives face aux altérations supergènes (approches terrain et expérimentale). Des plus résistants aux plus labiles nous distinguons :

- les particules opaques (LCO) qui peuvent être interprétées comme des vitrinites ou des inertinites, et dont les pertes ne dépassent pas 20 % quelque soit le mode d'altération. Une amorphisation de ces particules est possible, notamment lors de l'altération bactérienne expérimentale et du transfert Roches / Altérites ;

- les matières organiques amorphes rougeâtres (MOAr) ou opaques (MOAO) dont la nature n'a pas put être déterminée avec précision. Leurs pertes peuvent dépasser 40 % lors de l'hydrolyse expérimentale et des transferts Altérites / Terres fines et Altérites / Sols ;
- les débris gélifiés (DG), qui peuvent aussi être interprétés comme des vitrinites ou des inertinites, mais dont les pertes dépassent systématiquement 60 % lors des expérimentations et des transferts Altérites / Terres fines et Altérites / Sols. Nous observons parfois une oxydation et opacification de ces particules en LCO lors de l'oxydation expérimentale mais aussi sur le terrain (six mois d'altération « in situ »).

La perte totale en MO atteint au maximum 30 %¹¹² et ne concerne que la MOF libérée par l'altération chimique des roches (entrées dans les compartiments Sols et Terres fines). Si des pistes concernant la cause de ces pertes (minéralisation ou dissolution) ont put être évoquées grâce aux dégradations expérimentales (bactérienne, oxydation, hydrolyse), aucune réelle tendance ne peut être dégagée à l'échelle des bassins étudiés.

A-2) Bilans actuels de MOF / COF dans les bassins de Draix

Nous proposerons successivement un bilan stationnaire (contribution massique) et un bilan dynamique (flux et stockages) de la MOF / COF au sein des bassins étudiés. Nous discuterons ensuite les effets des différents paramètres géomorphologiques sur ces derniers.

A-2-1) Contribution massique en MOF dans les compartiments étudiés

Le développement du palynofacies quantitatif nous a permis d'estimer la contribution massique en MOF dans les compartiments étudiés. Celle-ci est significative et atteint en effet (tableau VI-1 et 2) 5,1 à 10,3 mg/g dans les roches (100 % de la MO totale); 5,3 à 5,7 mg/g dans les plaquettes d'altérites (>95 % de la MO totale) ; 5,8 à 6,8 mg/g dans les terres fines

¹¹² Cette perte serait sensiblement plus importante si la MOF était majoritairement constituée de DG, et moins importante si elle n'était composée que de LCO.

(20 à 90 % de la MO totale) ; 3,7 à 5,1 mg/g dans les sols (20 à 70 % de la MO totale) et environ 6 mg/g dans les particules fluviatiles (47 à 92 % de la MO totale).

Compartiments	Callovo-oxfordien	Toarcien	Aalénien supérieur
Sols (horizons A)	3,7 mg/g 20 à 40 % de la MO	5,1 mg/g 15 à 70 % de la MO	3,8 mg/g 5,5 à 30 % de la MO
Terres fines	5,8 mg/g 20 à 90 % de la MO	6,8 mg/g 55 à 75 % de la MO	5,8 mg/g 20 à 40 de la MO
Altérites (PL)	5,3 mg/g > 95 % de la MO	5,7 mg/g > 95 % de la MO	5,7 mg/g > 95 % de la MO
Roches	5,1 mg/g 100 % de la MO	10,3 mg/g 100 % de la MO	5,5 mg/g 100 % de la MO

Tableau VI-1: Contributions moyennes en MOF dans les compartiments Roches, Altérites, Terres fines et Sols des bassins de Draix. Ces contributions sont exprimées en masse (mg/g d'échantillon) et en % de la MO totale.

	Particules fluviatiles du Laval	Particules fluviatiles du Brusquet	Particules fluviatiles du Moulin
MOF mg/g	6,1 mg/g de MOF 75 à 88 % de ma MO	6,2 mg/g de MOF 47 à 91 % de la MO	5,4 mg/g de MOF 72 à 88 % de ma MO

Tableau VI-2: Contributions moyennes en MOF dans les particules fluviatiles des bassins du Laval, du Brusquet et du Moulin. Ces contributions sont exprimées en masse (mg/g d'échantillon) et en % de la MO totale.

A-2-2) Flux et stockages annuels de COF

La connaissance des chroniques d'exports actuels (particulaires et dissous) et leurs modélisations nous ont autorisé une première description des flux de COF en termes d'exports dans les eaux, ou de stockages dans les sols (tableau VI-3).

Les flux de COF libéré par l'altération mécanique des roches (F_{mCOF} en t/ha/an) atteignent 0,59 (le Laval), 0,003 (le Brusquet), 0,30 (le Moulin) et 0,68 (la Roubine) (cf. § V-A-1). Ce Corg alimente directement les particules fluviales sans pertes significatives (cf. § IV-A et C), et est rapidement exporté des bassins sous forme de COP vers de nouvelles zones de sédimentation (retenues artificielles sur la Durance et le Rhône, delta du Rhône).

Les flux de COF libéré par les altérations (bio)chimiques des roches (F_{cCOF} en t/ha/an) atteignent 0,019 (le Laval) ; 0,034 (le Moulin) et 0,011 (la Roubine). Celui libéré par les roches du Brusquet est estimé entre 0,02 et 0,08t/ha/an (modélisation, cf. § V-B-3-3). Ce COF peut : -1) soit résister aux altérations et être stocké dans les sols (70 % environ); -2) soit être perdu (30 % environ, minéralisé ou dissous)¹¹³.

Nous considérons donc que les flux de COF stocké dans les sols atteignent (en t/ha/an) 0,0133 (le Laval) ; 0,0238 (le Moulin) ; 0,0077 (la Roubine) et de 0,0140 à 0,0560 (le Brusquet), tandis que ceux de COF « perdu » atteignent (en t/ha/an) 0,0057 (le Laval) ; 0,0102 (le Moulin) ; 0,0033 (la Roubine) et de 0,0060 à 0,0240 (le Brusquet). Dans le cas d'une minéralisation totale du COF, ces pertes représenteraient une source en CO₂ pour l'atmosphère évoluant entre 0,021 et 0,088 t/ha/an selon le bassin versant.

¹¹³ L'érosion des sols n'apparaît pas comme une source significative alimentant les particules fluviales. Les teneurs de ces dernières en MOR sont trop faibles, et celles en pyrite trop fortes. Nous n'avons donc pas défini de flux de COF issu de cette érosion.

Type d'altération		Le Laval	Le Brusquet	Le Moulin	La Roubine
Altération mécanique	FmCOF	0,59 t/ha/an	0,003 t/ha/an	0,30 t/ha/an	0,68 t/ha/an
	Pertes maximales	0 %	0 %	0 %	0 %
	Export sous forme de COP (= FmCOF)	0,59 t/ha/an	0,003 t/ha/an	0,30 t/ha/an	0,68 t/ha/an
Altérations (bio)chimiques	FcCOF	0,019 t/ha/an	(estimation) 0,02 à 0,08 t/ha/an	0,034 t/ha/an	0,011 t/ha/an
	Pertes maximales	30 %	30 %	30 %	30 %
	Flux de COF stocké dans les sols (70 % des FcCOF)	0,0133 t/ha/an	0,0140 à 0,0560 t/ha/an	0,0238 t/ha/an	0,0077 t/ha/an
	Flux de COF "perdu" (minéralisation, ou dissolution) (30 % de FcCOF)	0,0057 t/ha/an	0,0060 à 0,0240 t/ha/an	0,0102 t/ha/an	0,0033 t/ha/an
	Flux de COF "perdu" par rapport au flux libéré total (%)	0,94%	26% à 29 %	3 %	0,48 %
Equivalent CO₂ (si minéralisation)	Flux potentiel de CO ₂ vers l'atmosphère	0,021 t/ha/an	0,022 à 0,088 t/ha/an	0,037 t/ha/an	0,012 t/ha/an

Tableau VI-3: Récapitulation des différents flux de COF au sein des bassins versants de Draix.

FmCOF : flux de COF libéré par l'altération mécanique des roches ;

FcCOF : flux de COF libéré par les altérations (bio)chimiques des roches ;

Le flux libéré total correspond à la somme des *FmCOF* et des *FcCOF*.

A-2-3) Effet des paramètres géomorphologiques et de l'anthropisation sur les flux de COF

Les flux de COF, exprimés en t/ha/an, sont significatifs. Ils témoignent cependant d'une importante variabilité d'un bassin à un autre. Ici s'illustre l'important contrôle exercé par les paramètres géomorphologiques des bassins versants (notamment le taux de végétalisation) sur les taux d'altérations mécaniques et chimiques (cf. § V-D).

La densité de végétation impacte grandement sur la part de COF « perdu » dans les flux totaux de COF libéré (altérations mécaniques et (bio)chimiques) (figure VI-1). Celle-ci est négligeable et inférieure à 1 % pour les bassins de la Roubine et du Laval (taux de terrain végétalisé de 21 et 32 %) mais peut atteindre 26 à 29 % pour le Brusquet (taux de terrain végétalisé de 87 %).

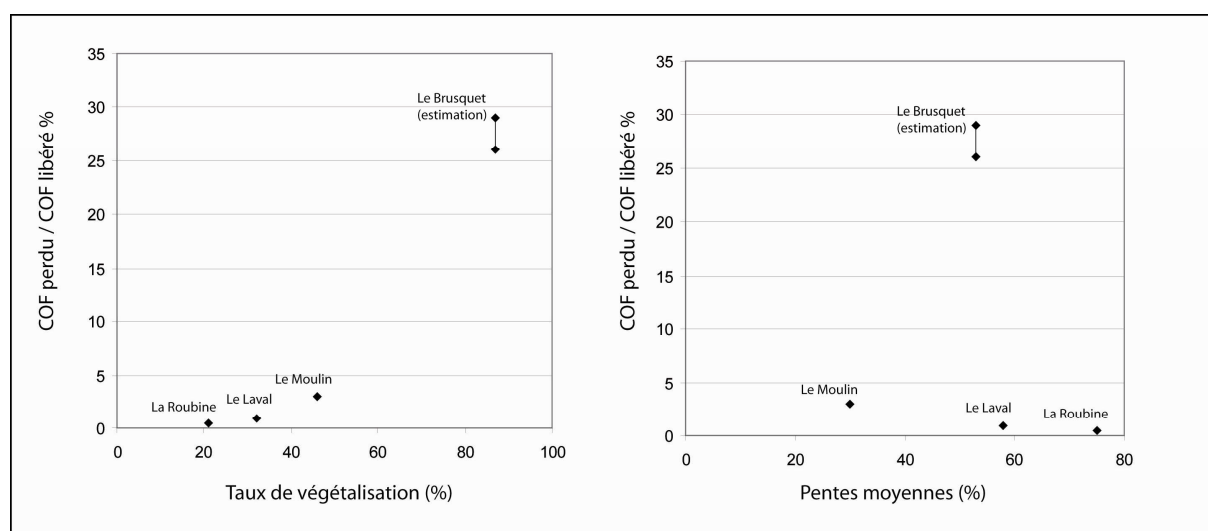


Figure VI-1: Effets du taux de végétalisation et de la pente sur la part de COF « perdu » par rapport au COF libéré par les altérations mécaniques et (bios) chimiques. La relation existante entre le taux de végétalisation et le rapport COF perdu / COF libéré témoigne de l'important contrôle du couvert végétal sur les flux de COF.

Ce contrôle peut aussi être illustré à travers une étude comparative des bassins du Laval et du Brusquet. Les fonctionnements de ces bassins apparaissent, en effet, opposés. Pour le premier, nous observons un FmCOF largement prédominant (0,59 t/ha/an) par rapport au FcCOF (0,0057 t/ha/an), tandis que ces flux sont relativement équilibrés dans le cas du Brusquet (FmCOF de 0,003 t/ha/an et FcCOF estimé entre 0,02 à 0,08 t/ha/an) (figure VI-2).

A pentes relativement égales (58 et 53 %), cette différence ne peut s'expliquer que par les taux de végétalisation très différents (32 et 87%).

Ces résultats mettent en avant l'impact de l'homme sur les flux de COF. L'important reboisement mené depuis la fin du XIX^{ème} siècle sur la région, et localement sur le Brusquet, a eut l'effet escompté : une diminution de l'altération mécanique et de la charge solide dans les rivières. Il s'en est suivi, pour ce qui nous concerne, une chute brutale des FmCOF (> 95 %) et un rééquilibrage avec les FcCOF se traduisant notamment par un stockage de COF accentué dans les sols, une augmentation du COF « perdu » potentiellement minéralisé, et un export diminué dans les eaux.

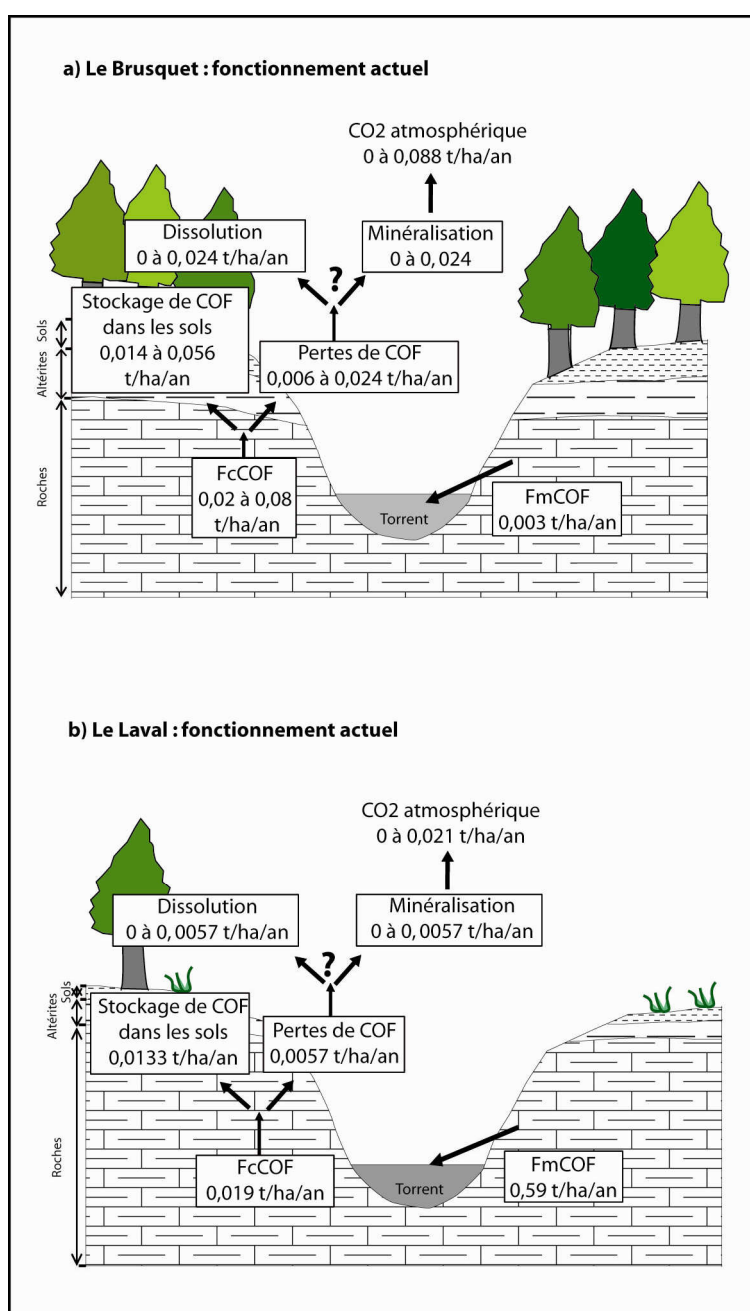


Figure VI-2: Flux et stockages actuels de COF au sein des bassins du Brusquet (a) et du Laval (b).

A-3) Flux de COF et de COR

Des bilans de COF étant proposés, il devient tentant de les situer par rapport aux bilans de COR. Notre approche différera toutefois de ce qui a été précédemment exposé. En effet, le COR produit par la végétation est extrêmement labile (cf. § IV-A-5-4 Et § IV-C-1), les fortes pertes observées le long des différents profils d'altérations (sols et altérites) en témoignent. Cependant, nous ne disposons pas, à l'heure actuelle, de données permettant de les quantifier¹¹⁴.

Nous proposons donc un raisonnement à l'échelle des 200 dernières années, où nous comparerons les masses de COF libérées par les altérations mécaniques et (bio)chimiques avec celles de COR produites par la végétation, les masses stockées dans les sols, et enfin, les masses exportées dans les eaux. Nous nous concentrerons, à nouveau, sur les bassins du Laval et du Brusquet qui sont les mieux documentés.

A-3-1) Estimation des flux et stocks de COF depuis 1800

Le COF libéré depuis 1800 correspond à la somme des FmCOF et FcCOF cumulés durant cette période (cf. § V-C-1-2 et § C-1-3). Cette libération atteindrait 11024 à 13140 t pour le Laval, et 6780 à 8620 t pour le Brusquet.

Le COF stocké dans les sols depuis 1800 atteindrait 52 à 193 t pour le bassin du Laval, et 333 à 728 t pour le Brusquet¹¹⁵.

Ces estimations établies à partir de flux sont cohérentes avec les capacités de stockage des sols approximées à partir des données de terrain (épaisseur moyenne et superficie des horizons A) et de leur teneur moyenne en COF. Ces capacités s'élèvent à 290 t pour le Laval et à 900 t pour le Brusquet¹¹⁶.

¹¹⁴ Nous ne possédons aucune donnée concernant, par exemple, la vitesse ou l'intensité de minéralisation du COR.

¹¹⁵ Ces chiffres sont obtenus à partir des FcCOF cumulés depuis 1800 pour les bassins du Laval (74 à 275 t), et du Brusquet (475 à 1040 t) (cf. § V-C-1-2). La part non perdue (donc stockée dans les sols) est estimée à 70%.

¹¹⁶ Nous avons utilisé pour ce calcul les surfaces végétalisées des bassins du Laval et du Brusquet (28 et 94 ha), les épaisseurs moyennes d'horizons A observées sur le terrain (20 cm), la densité moyenne de ces horizons (1,75) et sa teneur moyenne en COF (% MOF / 1,5). Stock de COF = 0,3 % de la masse totale de sol.

Le COF exporté sous forme de COP depuis 1800 atteindrait 10950 à 12865 t pour le Laval, et 6300 à 7580 t pour le Brusquet (cf. § V-C-1-2).

Le COF « perdu » depuis 1800 (minéralisé ou dissous) atteindrait 22 à 82 t pour le Laval, et 143 à 312 t pour le Brusquet¹¹⁷.

A-3-2) Estimation des flux et stocks de COR depuis 1800

Le COR produit depuis 1800 est le résultat de la Production Primaire Nette de la végétation présente sur les bassins¹¹⁸. La grande majorité des terrains végétalisés du Laval et du Brusquet le sont par des pins (88 et 100%, Vallauri, 1997). Compte tenu de la productivité de ces derniers (9 t/ha/an de MO, soit 4,5 t/ha/an de COR, Rodin et Bazilevic, 1966 ; Duvigneau, 1967 ; Ajtay et al, 1979) et des évolutions des taux de terrain végétalisé depuis 1800 (cf. § V-C-1-1), nous pouvons estimer que 9450 t et 53000 t de COR ont été produites au sein des bassins du Laval et du Brusquet.

Le COR stocké dans les sols depuis 1800 l'a majoritairement été suite à la reforestation des bassins (fin du XIX^{ème} siècle pour le Brusquet, cf. § V-C-1-1). Son estimation peut être approchée de deux façons :

-1) à partir des volumes d'horizons A et d'humus observés sur le terrain (figure VI-2) et de leur teneur moyenne en COR. Les stocks ainsi établis atteignent 2050 t pour le Laval et 7000 t pour le Brusquet¹¹⁹.

-2) à partir de la formule proposée par Dobremez et Machet (1997). Les stocks de carbone dans chaque horizon sont en effet calculés de la façon suivante :

$$\text{eq 1) Stock de C (t/ha)} = 10^{-2} \cdot C \cdot E \cdot (100 - p) / (0,57 + 0,067 \cdot C)$$

C = pourcentage massique de carbone ;

E = épaisseur de l'horizon en cm

P = pierrosité en pourcentage de volume du sol

¹¹⁷ Ces chiffres sont obtenus à partir des FcCOF cumulés depuis 1800 pour les bassins du Laval (74 à 275 t), et du Brusquet (475 à 1040 t) (cf. § V-C-1-2). Les pertes ont été estimées à 30 %.

¹¹⁸ La Production Primaire Nette (PPN) correspond à la différence entre la quantité totale de MO produite par les végétaux par photosynthèse (production primaire brute) pendant une période donnée, et les pertes dues notamment la respiration pendant ce même laps de temps.

¹¹⁹ Nous avons utilisé pour ce calcul les surfaces végétalisées des bassins du Laval et du Brusquet (28 et 94 ha), les épaisseurs moyennes d'horizons A et d'humus observées sur le terrain (20 et 3 cm), la densité moyenne de ces horizons (1,75 et 0,5) et leurs teneurs moyennes en COR (0,72 % pour les horizons A - palynofacies quantitatif sur 11 échantillons et 33% pour les humus - pyrolyse Rock Eval sur 14 échantillons). COR = 0,3 % de la masse totale d'horizon A et 33 % de la masse totale d'humus.

Aucune pierrosité n'est observée dans les sols étudiés ($p = 0$, figure VI-3), et nous considérons des valeurs C et E égales à 33 % et 3 cm pour les humus et à 0,72 % et 20 cm pour les horizons A. Les stocks de COR dans les sols ainsi calculés atteignent 1650 t pour le Laval et 5500 t pour le Brusquet.

Nous remarquons que les stocks obtenus selon les deux approches sont extrêmement comparables.

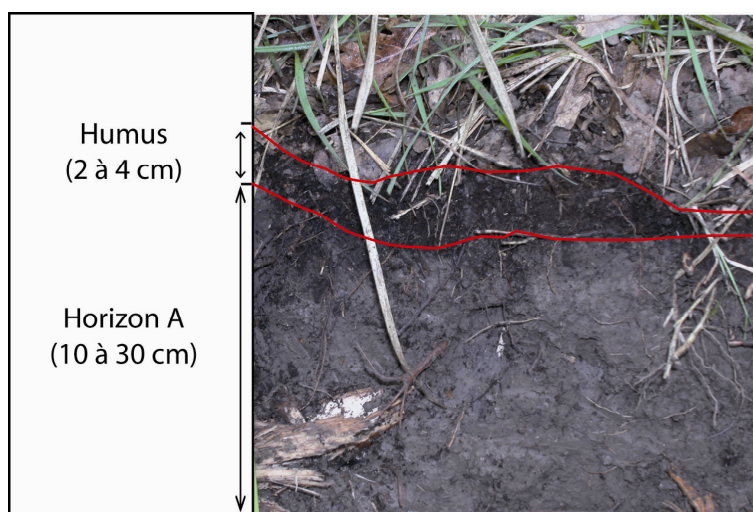


Figure VI-3 : Épaisseurs moyennes des humus et horizons A observés. L'épaisseur des humus varie entre 2 et 4 cm (nous retiendrons la valeur moyenne de 3 cm), et celle des horizons A varie entre 20 et 30 cm (nous retiendrons la valeur moyenne de 20 cm).

Le COR exporté sous forme de COP depuis 1800 peut être estimé à partir des teneurs en COR des particules fluviales des bassins versants du Laval et du Brusquet (0,04 et 0,32%, cf. § V-A-1-2-1). Celles-ci nous permettent de proposer des FCOR annuels moyens¹²⁰ de 0,065 t/ha/an pour un bassin possédant un faible taux de terrain végétalisé, et de 0,002 t/ha/an pour un bassin fortement végétalisé¹²¹. Compte tenu de l'évolution des taux de végétalisation (cf. §.V-C-1-1), nous considérons que 1150 et 620 t de COR pourraient avoir été exportées des bassins du Laval et du Brusquet depuis 1800.

¹²⁰ Les teneurs en COR des particules fluviales du Laval et du Brusquet représentent environ 11 et 64 % de la teneur moyenne en COF (0,5%). FCOR du Laval = 11% du FmCOF du Laval et FCOR du Brusquet = 64% du FmCOF du Brusquet.

¹²¹ Le FCOR estimé pour les bassins à faibles taux de végétalisation est plus fort que celui estimé pour les bassins à forts taux de végétalisation. Ce phénomène s'explique l'écart important des flux d'exports solides exportés par ces deux pôles (à titre d'exemple 118 t/ha/an pour le Laval et 0,7 t/ha/an pour le Brusquet).

Le COR « perdu » depuis 1800 (minéralisé ou dissous) est obtenu par différence entre les masses de COR produites avec celles stockées ou exportées. Il atteint environ 8900 t pour le Laval et 47700 t pour le Brusquet.

A-3-3) Comparaison des flux et stocks de COF et COR depuis 1800

Les valeurs de flux et stocks de COF et COR proposées à l'échelle des bassins du Laval et du Brusquet (tableau VI-4 et figure VI-4) doivent bien évidemment être considérées comme des premiers ordres de grandeurs. Elles permettent cependant de comparer ces deux types de Corg et les situer en termes d'apports aux milieux, sols, eaux, et échanges avec l'atmosphère.

		Le Laval (1800-actuel)	Le Brusquet (1800-actuel)
COF	COF libéré (tonnes)	11024 à 13140	6780 à 8620
	COF stocké dans les sols (tonnes)	52 à 193	333 à 728
	COF exporté sous forme de COP (tonnes)	10950 à 12865	6300 à 7580
	COF « perdu », minéralisé ou dissout (tonnes)	22 à 82	143 à 312
	Apport potentiel de CO₂ vers l'atmosphère (tonnes) si minéralisation	81 à 301	524 à 1144
COR	COR produit (tonnes)	9450	53000
	Equivalent CO₂ (tonnes)	34650	194300
	COR stocké dans les sols (tonnes)	1650 à 2050	5500 à 7000
	COR exporté sous forme de COP (tonnes)	1150	620
	COR « perdu », minéralisé ou dissout (tonnes)	6450 environ	46100 environ
	Apport potentiel de CO₂ vers l'atmosphère (tonnes) si minéralisation	25300	174900

Tableau VI-4: Estimation des productions, stocks et exports de COR et COF au sein des bassins versants du Laval et du Brusquet depuis 1800.

Apports aux milieux : Le Corg produit par la végétation sur la période considérée est très largement supérieur au Corg libéré par l'altération des roches dans le bassin du Brusquet. Compte tenu du caractère végétalisé de ce dernier, ce phénomène n'est guère surprenant. Il est par contre intéressant de noter que végétation et roches ont produit, ou libéré, des quantités de

Corg équivalentes dans le bassin du Laval. En d'autres termes, dans ce bassin depuis 1800, « un Corg apparu dans le milieu sur deux est d'origine fossile ».

Apports aux sols : Une grande part du Corg accumulé dans les sols est bien évidemment d'origine récente (> 90%), majoritairement concentré dans les humus.

Apports aux cours d'eaux : la tendance est ici inversée et 95 % du Corg exporté des bassins sous forme de COP est d'origine fossile¹²².

Echanges avec l'atmosphère : Ces échanges apparaissent relativement réduits pour ce qui concerne le COF. Ils se limitent, en effet, à un apport potentiel de CO₂ dans l'atmosphère n'excédant pas 1200 t pour le Brusquet et sur la période considérée¹²³. Cette valeur n'est absolument pas comparable avec les échanges liant la végétation et l'atmosphère, notamment par les quantités de CO₂ mise en jeu, exprimées en dizaines, voire centaines, de milliers de tonnes, et par la dynamique équilibrée entre ponction (puits) et libération (source) pour l'atmosphère.

¹²² La part de COF dans le flux de COD est inconnue.

¹²³ Dans l'hypothèse d'une minéralisation totale du COF perdu.

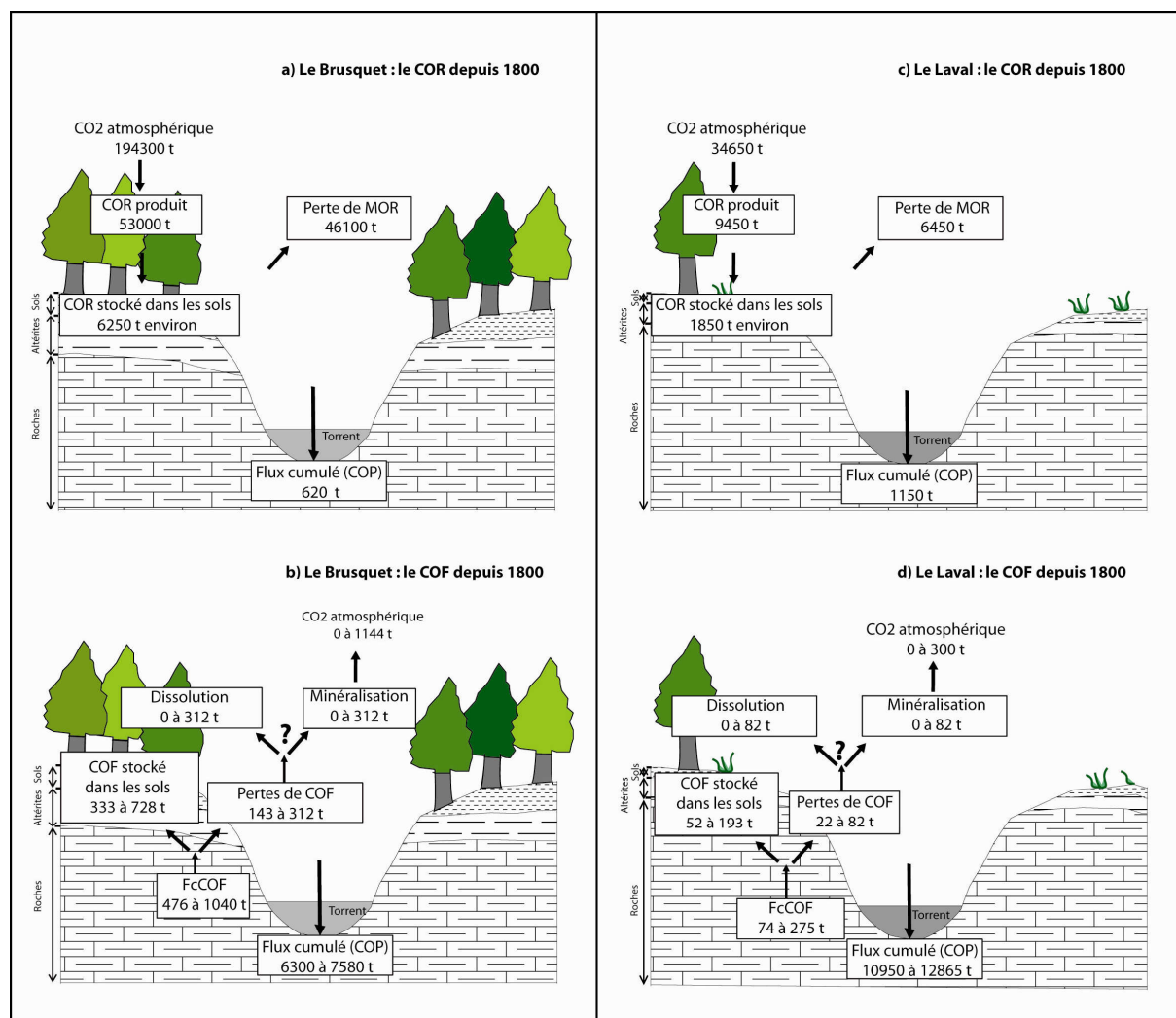


Figure VI-4: Comparaisons des flux, stocks et exports de COR (Carbone Organique Récent) et COF (Carbone Organique Fossile) au sein des bassins versants du Brusquet (a et b) et du Laval (c et d) durant les deux derniers siècles.

B) les enseignements extrapolables à d'autres études

B-1) Les apports du palynofacies quantitatif

Le développement du palynofacies quantitatif constitue l'une des avancées majeures de ce travail. Cette méthode, permettant à la fois de tenir compte de la pluralité de la MO, et de la quantifier, nous a permis -1) d'estimer la contribution en COF et COR dans l'ensemble des compartiments étudiés ; -2) de mettre en évidence le comportement différentiel des différents constituants organiques face aux divers types d'altérations ; et enfin -3) d'estimer les pertes en COF lors des différents transferts entre compartiments. Ces données ont été indispensables pour l'estimation des différents stocks et flux de COF présents au sein des bassins versants de Draix.

Nous retiendrons que cette méthode possède un large champ d'applications dans des domaines variés. Nous prendrons comme exemple le domaine du paléo-environnement où elle permet un suivi quantitatif des différents marqueurs organiques, caractéristiques des sols, litières ou roches, présents dans les sédiments étudiés. Une étude de ce type est actuellement en cours à l'ISTO (Annaelle Simonneau (2009) : Reconstitution des changements environnementaux en altitude dans le massif des Grandes Rousses (Alpes Occidentales) à partir de l'analyse pluridisciplinaire de la sédimentation organique holocène dans les remplissages sédimentaires des lacs proglaciaires de Bramant et Blanc Huez. Master Géotransfer. Université d'Orléans). La figure IV-5, que nous ne commenterons pas, illustre les premiers résultats obtenus.

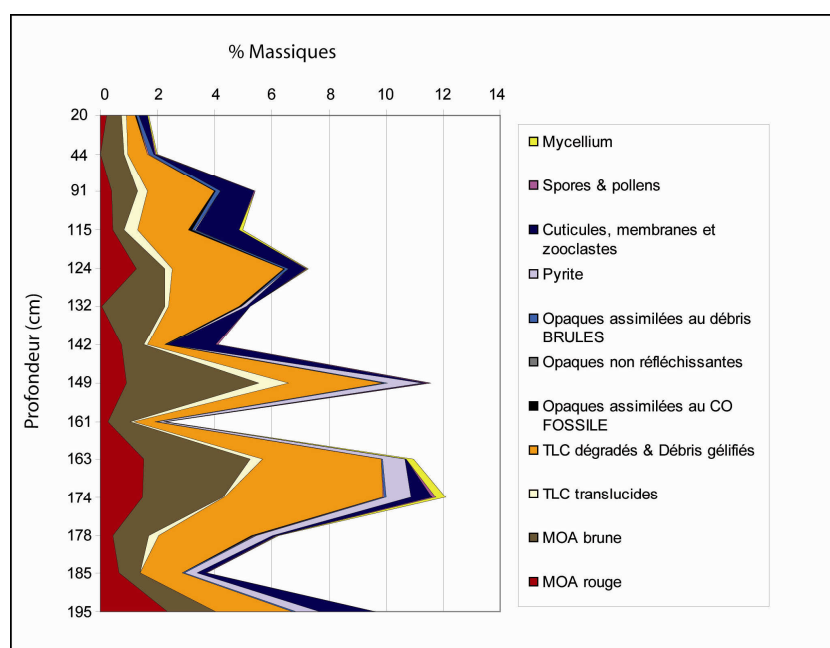


Figure VI-5: Evolution de la masse des différentes matières organiques présentes le long d'une carotte sédimentaire du lac Bramant (massif des Grandes Rousses, France). Ces données seront interprétables en termes de fluctuation du paléo-environnement dans la région étudiée (Simmoneau, 2009). .

B-2) Flux et devenir du COF libéré

B-2-1) Les flux de COF libéré

Les bassins de Draix apparaissent comme représentatifs des différents bassins versants marneux de la moyenne Durance. Ils sont aussi comparables à d'autres bassins versants étudiés à travers le monde :

- à travers la proximité des flux de COF exporté sous forme de COP. Ces derniers évoluent entre 0,003 à 0,680 t/ha/an pour les bassins de Draix, valeurs similaires au flux moyen de 0,5 t/ha/an¹²⁴ rapporté pour diverses rivières montagneuses nord américaines, néo-zélandaises et taiwanaïses (Kao et Liu, 1996 ; Leithold et Blair, 2001 ; Leithold *et al*, 2006 ; Hilton *et al*, 2008) ;
- à travers la proximité du contrôle exercé sur le contenu organique des particules fluviales par les paramètres géomorphologiques des bassins versants (taux de terrains végétalisés,

¹²⁴ Le COF représente 47 à 92 % des flux de COP totaux de ces rivières. Lorsque mentionnés (rivières néo-zélandaises et taiwanaïses) ce flux de COP évolue entre 0,1 et 1 t/ha/an.

relief). Ce phénomène est observé à Draix, mais aussi sur d'autres sites (rivières nord américaines et néo-zélandaises, Raymond et Bauer, 2004 ; Leithold *et al*, 2006) ;

- à travers l'impact anthropique sur les flux de COF. Celui-ci se traduit à Draix par une reforestation protégeant les roches de l'érosion mécanique (diminution du COF libéré), et inversement à Taïwan (rivière Lanyang Hsi) par une construction de routes favorisant cette même érosion (augmentation du COF libéré) (Kao et Liu, 1996).

Cette représentativité suggère que les résultats obtenus sur Draix peuvent être étendus à d'autres bassins versants mondiaux. La description de ces derniers selon les paramètres faciles d'acquisition que sont taux de terrain végétalisé, pentes moyennes et précipitations annuelles moyennes pourrait autoriser, afin de donner de premiers ordres de grandeurs, une modélisation empirique simple des flux de COF sans qu'aucune mesure de flux de matériel solide, ou dissous, ne soit réalisée dans l'immédiat.

B-2-2) La dégradabilité différentielle des particules organiques

La MOF des échantillons étudiés est constituée d'un ensemble de particules diverses. Ces dernières (particules opaques – LCO ; matières organiques amorphes rougeâtres – MOAr ; et débris gélifiés – DG) sont communément observées dans les différentes roches sédimentaires à travers le monde (cf. § III-D-1-1-1). Leur suivi au sein des différents compartiments Roches, Altérites, Terres fine, Sols et Particules fluviales nous a permis de mettre en évidence leurs réponses différentielles (pertes ou transformations) face aux divers types d'altérations. Ces résultats sont reproductibles par dégradations expérimentales.

Il est en conséquence très difficile de proposer une définition simple de la MOF, et encore plus de la qualifier de résistante ou de labile face aux altérations supergènes. Ultérieurement, toute étude portant sur le comportement de cette MO, quelque soit le site retenu, devra à la fois prendre en compte -1) sa composition initiale ; et -2) le type d'altération.

Parallèlement, nous avons observé une perte significative, voire totale, en pyrite (approches terrain et expérimentale). Cette extrême labilité, comparativement à la MOF (pertes maximales de 30%), va à l'encontre des résultats présentés dans la littérature qui

associent de façon manichéenne l'oxydation de la matière organique avec l'oxydation de la pyrite (Petsch *et al*, 2000).

B-3) La datation des sédiments

La contribution significative de COF dans le cycle supergène est susceptible de provoquer un « vieillissement » conséquent des âges radiocarbones mesurés pour les sols, particules fluviatiles ou sédiments pollués. Ce phénomène est dommageable pour les études (notamment paléo-environnementales) nécessitant ce type de datation.

Nous proposons une équation théorique permettant d'établir une correction de l'âge mesuré en connaissant la proportion de MOF (équation 1, figure VI-5) :

$$\text{eq 1) } \hat{\text{âge réel}} = (\text{BP}) = \hat{\text{âge mesuré}} (\text{BP}) - \ln \left(\frac{100}{100 - \% \text{ MOF}} \right) \times 8032$$

Nous remarquons que les couples de valeurs, âge radiocarbone / % de MOF obtenus de façon analytique pour trois échantillons de Draix (MES et horizon A) sont cohérents avec cette relation. Ce dernier point valide la correction proposée.

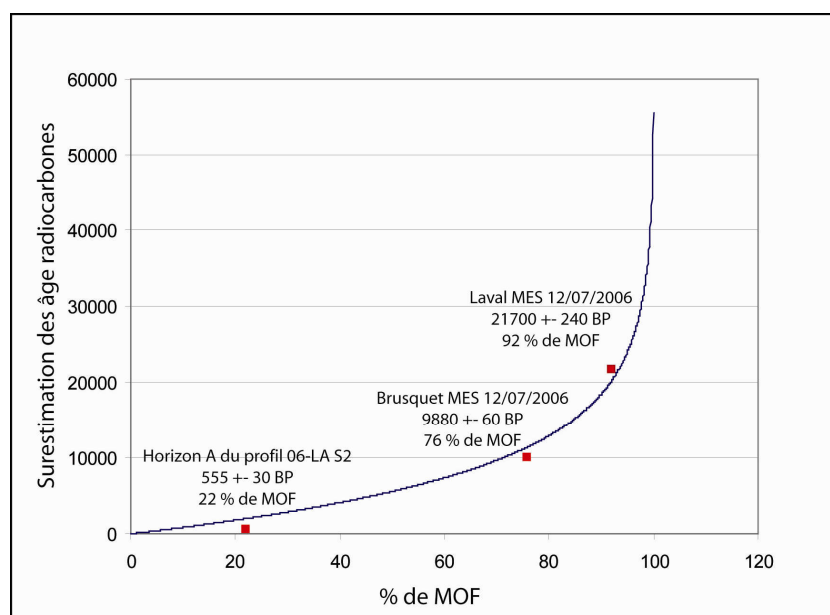


Figure VI-6 : « Vieillissement » des âges radiocarbones en fonction de la proportion en MOF.

- « vieillissement » estimé (courbe bleue) ;
- âges radiocarbones et % de MOF des échantillons de MES du Laval et du Brusquet prélevés le 12/07/2006 et de l'horizon A du profil 06-LA S2 (carrés rouges).

C) Manques et perspectives

C-1) A l'échelle des bassins de Draix

Ce travail a principalement porté sur les stocks et flux de MOF au sein des bassins de Draix. Si les résultats obtenus nous ont permis d'estimer des pertes en MOF pouvant atteindre 30 % dans les sols et terres fines, nous ne sommes, pour l'heure, pas en mesure de discuter des mécanismes intrinsèques prévalant au sein de la MOF lors de ces pertes, ni de l'impact de la température. De plus, nous ne possédons aucun élément concret permettant l'estimation de la part minéralisée, ou dissoute.

Sur le premier point, nous nous contenterons de remarquer que le comportement contrasté des diverses particules constituant la MOF sous entend l'action de processus complexes, certainement dépendants de la composition initiale de la MO. La compréhension de ces processus nécessite un suivi de la composition chimique de chaque type de MOF lors des différentes altérations (bactérienne, oxydation ou hydrolyse). Les spectrométries RAMAN et infrarouge, ou encore la microscopie électronique en transmission apparaissent comme des techniques adaptées à cette étude.

Sur le second point, nous retiendrons qu'une estimation des flux annuels de COF exportés des bassins sous forme dissoute se révèle nécessaire. Ceci peut passer par la définition, et le suivi, de marqueurs géochimiques, ou isotopiques, de ces flux. Cette approche sera menée durant les années à venir à travers le programme OXYMORE¹²⁵ (responsable J. Gaillardet).

C-2) Les autres types de bassins versants

Ce travail est resté focalisé sur les formations marneuses de Draix et les résultats obtenus ne sont extrapolables que sur des formations équivalentes (25,4 % des surfaces continentales, Copard *et al*, 2007). L'estimation de la production en COF issue de l'altération des roches à l'échelle globale nécessite la prise en compte des autres lithologies susceptibles de contenir du Corg : les calcaires (13,4 % des surfaces continentales), les roches

¹²⁵ Programme soumis à l'appel d'offre ANR 2009.

sédimentaires non carbonatées (grès : 26,2 % des surfaces continentales) et certaines roches métamorphiques (26 % des surfaces continentales, Amiotte Suchet, 1995).

Chaque facies possède des propriétés physiques propres conditionnant leurs réponses face aux altérations mécaniques et chimiques, mais aussi sa propre histoire jouant sur la nature de la MO initiale, sur son évolution et donc sur sa réactivité. A titre d'exemple, Galy *et al* (2008) ont montré que le métamorphisme peut stabiliser le COF (sous forme de graphite par exemple) et le rendre quasiment inoxydable.

C-3) Les flux de COF à l'échelle globale

L'altération chimique des roches libérerait annuellement 0,04 Gt COF/an à l'échelle mondiale (Copard *et al*, 2007), flux comparable à celui de COP véhiculé dans les cours d'eau (0,09 et 0,3 GtC/an, Berner, 1992 ; Ludwig *et al*, 1996 ; Stallard, 1998). Les résultats obtenus sur Draix suggèrent que le flux libéré par l'altération mécanique peut être beaucoup plus important¹²⁶. Son estimation à l'échelle globale pourrait être obtenue à travers deux approches complémentaires :

- la première (approche amont) consisterait en une modélisation empirique du flux de COF libéré par l'altération mécanique à l'aide des cartes de la lithologie des continents, du runoff et du couvert végétal. Nous émettons cependant quelques réserves sur la faisabilité à court terme de ce projet car nous ne disposons pas des -1) connaissances nécessaires sur l'érodabilité des différentes formations géologiques non marneuses ; et -2) de données suffisamment précises sur les densités de végétation. Des études préalables sur d'autres sites, et un effort de cartographie à l'échelle mondiale, sont nécessaires ;

- la deuxième (approche aval) consisterait en une estimation du flux de COF transporté sous forme de COP vers les océans. Dans ce but, nous pouvons utiliser les âges radiocarbone des particules fluviatiles transitant dans les principaux bassins versants mondiaux. En effet, le « vieillissement » possible de ces âges, induit par une contribution en Corg inerte (COF issu de l'altération des versants ou résidus de combustibles fossiles), peut nous permettre d'estimer

¹²⁶ A l'échelle globale, les flux (non organiques) libérés par l'altération mécanique (14,5 à 23 Gt/an) sont 3 à 5 fois supérieurs aux flux libérés par l'altération chimique (4 Gt/an) (Probst 1992).

cette contribution à travers deux étapes : - 1) le calcul du « vieillissement » par comparaison entre l'âge mesuré sur le « bulk » et l'âge réel de l'échantillon (pouvant être mesuré sur macro-restes) ; et -2) le calcul de la contribution en Corg inerte (équation 2).

$$\text{eq 2) } Ci (\%) = 100 - \frac{100}{e^{\frac{Vi}{8032}}}$$

Où Ci (%) = contribution en carbone inerte au sein du carbone organique total et Vi (âge BP) = vieillissement estimé.

A titre d'exemple, Raymond et Bauer (2001) proposent un âge d'environ 4600 ans BP pour le COP actuellement véhiculé par le Hudson. Cette valeur pourrait traduire la présence de 44 % de carbone inerte, potentiellement fossile...

Conclusion générale

Ce travail s'est intéressé au problème de la libération, et du devenir, du Carbone Organique Fossile (COF) lors de l'altération des roches sédimentaires. Cet aspect du cycle du carbone est encore très controversé et possède des implications à la fois sur l'estimation des stocks dans les compartiments atmosphère, lithosphère, pédosphère et hydrosphère, mais aussi des flux existants entre ces derniers. Avancer sur ce problème nécessitait de répondre à trois principaux champs de questions (cf. Introduction) :

- *Existe-t-il un seul type de COF ?*

- *En quelle quantité le COF est-il libéré lors de l'altération de sa roche mère? Selon quelle modalité (érosion mécanique – altération chimique) ?*

- *Quel est son devenir selon les diverses modalités de libération? Se minéralise-t-il et alimente-t-il l'atmosphère en CO₂? Contribue-t-il au stock de carbone contenu dans les sols, ou est-il transféré par les rivières?*

Plutôt que de focaliser notre étude sur une matière organique « idéale », c'est à dire faiblement mature, donc sensible voire réactive aux processus d'altération, nous avons préféré nous concentrer sur le COF libéré par les formations marneuses. En effet, comparativement aux autres formations géologiques, leurs fortes teneurs en matière organique et leur forte sensibilité face aux altérations en font une source privilégiée de COF à l'échelle globale. Elles sont d'ailleurs susceptibles de contribuer très largement (95%) au flux de COF libéré par l'altération chimique des roches (0,04 t/ha/an) (Copard *et al*, 2007).

Cette problématique nous a conduit à travailler, à travers une approche multi-compartiments – multi analytique, sur des bassins versants aux caractéristiques complémentaires connues (taux de végétation, pente), et pour lesquels un nombre important de données était disponible (chroniques de flux particulières ou dissous, précipitations moyennes annuelles). Notre choix s'est donc tout naturellement porté sur les bassins versants expérimentaux de Draix, équipés et suivis par le Cemagref depuis une vingtaine d'années.

Les différents résultats, obtenus notamment -1) grâce au développement d'une nouvelle méthode analytique (palynofaciès quantitatif) ; -2) par la confrontation de données de terrains et données issues d'expérimentation ; et -3) par la modélisation des flux de carbone à l'échelle des bassins étudiés, nous permettent d'apporter quelques éléments de réponses aux questions précédemment posées.

- Existe-il un seul type de COF ?

Il n'existe pas un seul type de COF. La MOF représente un ensemble de populations de caractéristiques variées (tailles, compositions, densités) possédant des comportements contrastés face aux différents types d'altération supergènes. Nous opposons ainsi des particules labiles à d'autres plus réfractaires. La prise en compte de cette double pluralité (type de particule, modalité d'érosion) constitue un préliminaire indispensable à toute étude concernant les bilans de carbone organique à l'échelle des bassins versants.

- En quelle quantité le COF est-il libéré lors de l'altération de sa roche mère ? Selon quelle modalité (érosion mécanique – altération chimique) ?

Pour les bassins étudiés, les quantités de COF libérées sont significatives et s'expriment en tonnes par hectares par an. Les flux liés à l'altération mécanique des différents bassins (de 0,003 à 0,680 t/ha/an) prédominent très largement ceux liés aux altérations (bio)chimiques (0,010 et 0,080 t/ha/an), ce qui n'apparaît pas surprenant lorsque l'on considère le contexte morphologique de la région étudiée, marqué par un important ravinement (badlands). Ces flux dépendent initialement de la quantité de Corg contenue dans la roche altérée, mais sont aussi contrôlés par des paramètres d'ordre géomorphologiques (taux de terrain non végétalisé – pentes moyennes des bassins versants) et climatiques (précipitations moyennes annuelles). Sur ce point, les modèles développés durant cette étude suggèrent que, pour les bassins étudiés, et sur l'échelle de temps envisagée (200 ans), ces flux dépendent majoritairement de la densité de la couverture végétale. Ici s'illustre le rôle indirect de l'homme qui, par la mise en place d'une politique, justifiée..., de reforestation à la fin du XIX^{ème} siècle, a contribué sur les secteurs reboisés à une diminution significative (>95%) des flux de COF libéré par l'altération mécanique et à un rééquilibrage avec les flux issus des altérations (bio)chimiques.

- Quel est son devenir selon les diverses modalités de libération? Se minéralise-t-il et alimente-t-il l'atmosphère en CO₂; contribue-t-il au stock de carbone contenu dans les sols, ou est-il transféré par les rivières?

Preuves sont fournies qu'une part du COF disparaît (30 % au maximum). Cette perte ne concerne que le COF libéré par altération chimique des roches et varie selon la nature de la MO, mais aussi selon le type de « mécanisme altérant » (oxydation, hydrolyse, activité biologique). Si quelques pistes concernant le devenir de ce Corg perdu ont pu être évoquées par le biais des dégradations expérimentales conduites (dissolution dans un cas, minéralisation dans l'autre), aucune tendance ne peut être pour l'heure dégagée à l'échelle des bassins versants étudiés.

Preuves sont aussi fournies qu'une part significative du COF libéré contribue au stock des sols ou alimente les rivières. Les contributions de COF au sein de ces compartiments, estimées grâce au développement de la méthode du palynofacies quantitatif, sont très largement significatives (3 mg/g dans les horizons organo-minéraux des sols, 4 mg/g dans les particules fluviales), et directement comparables, voire supérieures, aux contributions du carbone récent.

A l'échelle des bassins de la Durance et du Rhône, la résistance de la MOF, associée à l'extrême érodabilité des formations marneuses, peut conduire à une surreprésentation de la contribution fossile dans ces cours d'eau en dépit de faible surface d'affleurement. L'estimation préliminaire proposée dans ce travail pour le Rhône apparaît particulièrement démonstrative à cet égard : le COF libéré par l'érosion des terres noires nues de moyenne Durance (0,24% du bassin versant du Rhône) pourrait aujourd'hui représenter jusqu'à 16 à 27% du COP du fleuve.

Quelques éléments de réponses aux questions initialement posées ont donc été apportés mais beaucoup d'inconnues subsistent encore au terme de ce travail. Quels sont, par exemple, les mécanismes intrinsèques prévalents lors de la dégradation de la MOF ? Quelles proportions sont réellement minéralisées ou dissoutes ? Quel est le rôle de la température ? Quels flux sont délivrés par les autres types de lithologies ? Qu'en est-il au niveau global ?

Toutes ces inconnues existent, c'est un fait, mais elles n'oblitérent pas une certitude : la nécessaire prise en compte de la composante fossile dans les estimations de stocks et flux de carbone dans les sols, rivières et sédiments récents : finalement, dans le cycle du carbone actuel.

Références Bibliographiques

A-

- Adams, J., Faure, H., Faure-Denard, L., McGlade, J.M., Woodward, F.I., 1990. Increases in terrestrial carbon storage from the Late Glacial Maximum to the present. *Nature*, 348, 6303, 711-714.
- Adams, J., Faure, H., 1996. Changes in moisture balance between glacial and interglacial conditions/ influence on carbon cycle processes, in: Brandson, J., Brown, A.G., Gregory, K.J. (Eds), *Global Continental Change: The Context of Paleohydrology*. Geological Society of London, Special Publication 115, 27-42.
- Aitkenhead, J.A., McDowell, W.H., 2000. Soil C:N ratio as a predictor of annual riverine DOC fluxes at local and global scales. *Global Biogeochemical Cycles* 14, 127-138.
- Alberic, P., 1998. Transformation of riverine organic matter from sinking stream recharge to spring discharge in karst aquifer. *Mineralogical magazine*, 62(a), 36-37.
- Alpern, B., P., 1980. *Pérogaphie du Kérogène*. Dans *Kerogen*, B. Durand (Eds), Technips, Paris, 339-383.
- Amiotte-Suchet, P., 1995. Cycle du carbone, érosion chimique des continents et transferts vers les océans. *Sci. Géol. Mém.*, Strasbourg, 97, 156 p..
- Amiotte-Suchet, P., Probst, J.L., Ludwig, W., 2003. Worldwide distribution of continental rock lithology: implications for the atmospheric/soil CO₂ uptake by continental weathering and alkalinity rivers transport to the oceans. *Global Biogeochemical Cycles* 17(2): 1038. DOI:10.1029/2002GB001891.
- Artru, P., 1972. Les terres noires du bassin rhodanien (Bajocien supérieur à oxfordien moyen) : stratigraphie, sédimentologie, géochimie). Thèse de doctorat, Université de Lyon.
- Ajtay, G.L., Ketner, P., Duvigneaud, P., 1979. Terrestrial primary production and phytomass. In: *The global carbon cycle*, B. Bolin, E.T. Degens, S. Kempe & P. Ketner eds, SCOPE 13, Wiley & sons, 129-182.

B-

- Balesdent, J., 1996. The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. *European Journal of Soil Science* 47, 485-493.
- Batjes, N.H., 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47, 141-163.
- Battarbee, R.W., Kneen, M.J., 1982. The use of electronically counted microspheres in absolute diatom analysis. *Limnol. Oceanogr.* 27(1), 184-188.
- Behar, F., Beaumont, V., Pentead, H.L De B., 2001. Rock-Eval 6 Technology : Performances and Developments. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* 56(2), 111-134.
- Berner, R.A., Lasaga, A.C., Garrels, R.M., 1983. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effects on atmospheric carbon dioxide over the past 100 millions years. *American Journal of Science* 283, 641-683.

- Berner, R.A., 1989a. Biogeochemical cycles of carbon and sulphur and their effect on atmospheric oxygen over Phanerozoic time. *Paleogeogr. Paleoclimatol. Paleoecol* 75; 97-122.
- Berner, R.A., Canfield, D.E., 1989b. A new model for atmospheric oxygen over phanerozoic time. *American Journal of Science* 289, 333-361.
- Berner, R.A., 1991. A model for atmospheric CO₂ over phanerozoic time. *American Journal of Science* 291, 339-376.
- Berner, R.A., 1992. Comments on the role of marine of marine sediment burial as a repository for anthropogenic CO₂. *Global Biogeochemical Cycles*, 6(1), 1-2.
- Berner, R.A., 1994. GEOCARB II: a revised model for atmospheric CO₂ over phanerozoic time. *American Journal of Science* 294, 56-91.
- Berner, R.A., Maasch, K.A., 1996. Chemical weathering and controls on atmospheric O₂ and CO₂: Fundamental principles were enunciated by J. J. Ebelmen in 1845. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60 (9), 1633-1637.
- Berner, R.A., 1998. The carbon cycle and carbon dioxide over Phanerozoic time: the role of land plants. *Phil. Trans. R. So. Lond. B*, 353, 75-82.
- Berner, R.A., Kothavala, Z., 2001. GEOCARB III: a revised model for atmospheric CO₂ over phanerozoic time. *American Journal of Science* 301, 182-204.
- Berner, R.A., 2003a. The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. *Nature* 426, 423-426.
- Berner, R.A., 2003b. The rise of trees and their effects on Paleozoic atmospheric CO₂ and O₂. *C. R. Geoscience*, 335, 1173-1177.
- Berner, R.A., 2006. GEOCARBSULF: A combined model for Phanerozoic atmospheric O₂ and CO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 5653-5664.
- Bertier, C., Bouchard, J.P., 2007. Gestion sédimentaire à l'échelle d'un bassin versant : la Durance. Colloque Hydroécologie EDF / LNHE, 19-20 novembre 2007.
- Beyssac, O., Rouzaud, J.N., Goffe, B., Brunet, R.F., Chopin, C., 2002. Graphitization in a high-pressure, low-temperature metamorphic gradient: a Raman microspectroscopy and HRTEM study. *Contrib Mineral Petrol* ; 143: 19-31.
- Bilodeau, G., De Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., Josenhans, H., 1990. Post glacial palaeoceanography of Hudson bay: stratigraphic microfaunal and palynological evidence. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 27, pp. 946-963.
- Blair, N.E., Leithold, E.L., Ford, S.T., Peeler, K.A., Holmes, J.C., Perkey, D.W., 2003. The persistence of memory: The fate of ancient sedimentary organic carbon in a modern sedimentary system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(1), 63-73.
- Blair, N.E., Leithold, R.L., Aller, R.C., 2004. From bedrock to burial: the evolution of particulate organic carbon across coupled watershed-continental margin systems. *Marine Chemistry*, 92, 141-156.
- Boussafir, M., 1994. Microtexture et structure ultrafine des roches et matières organiques pétrolières. Thèse de doctorat, l'Université d'Orléans. .
- Boussafir, M., et Lallier-Vergès, E., 1997. Accumulation of organic matter in the Kimmeridge Clay Formation (KCF): an update fossilisation model for marine petroleum source-rocks. *Marine and Petroleum Geology*, 14, 75-83.
- Breheret, J.G., 1995. l'Aptien et l'Albien de la fosse vocontienne (des bordures au bassin). Evolution de la sédimentation et enseignements sur les événements anoxiques. Thèse de doctorat, Université de Tours, 2 volumes, 564p.
- Brochot, S. and Meunier, M., 1995. Erosion en badlands dans les Alpes du Sud : synthèse. Dans *Compte-rendu de recherches*, n° 3, BVRE de Draix. Cemagref éditions , 141-174.

- Brugman, W., Van Bergen, P.-F., Kerp, J.H.-F., 1994. A quantitative approach to Triassic palynology : the Lettenkeuper of the Germanic basin as an example. Dans *Sedimentation of organic particles*. A. Traverse (ed), Cambridge University Press. 409-429.
- Buillit, N., Lallier-Verges, E., Disnar, J.R., Loiseau, J.L., 1997. Changements climatiques et effets anthropiques au cours du dernier millénaire attesté par l'analyse pétrographique de la matière organique. (Annecy, le petit lac, France). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 168, 5, 573-584.
- C-**
- Campy, M., Macaire, J.-J., 1989. Géologie des formations superficielles. Géodynamique - faciès - utilisation . Ed Masson, Paris, 433 p.
- Campy, M., Macaire, J.J., 2003. Géologie de la surface. Erosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux, second Ed. Dunod, Paris. 440 p.
- Carter, MR., Angers, DA., Gregorich, EG., Bolinder, MA., 1997. Organic carbon storage and nitrogen stocks and storage profiles in cool, humid soils of eastern Canada. *Canadian Journal of Soils Science* 77(2), 205-210.
- Chang, S., et Berner, R.A., 1998. Humic Substance formation via the Oxidative Weathering of Coal. *Envir? Sci. Technol.* 32, 2883-2886.
- Chang, S., et Berner, R.A., 1999. Coal weathering and the geochemical carbon cycle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63 (19-20), 3301-3310. *Rev. Écol. (Terre Vie)*, supplément 9.
- Chauvin, C., Vallauri, D., 2002. Indicateurs de restauration écologique de marnes dégradées dans les Alpes du sud, 120 ans après reboisement.
- Combaz, A., 1964. Les palynofaciès. *Revue de Micropaléontologie* 7, 205-218.
- Combaz, A., Bellet, J., Poulain, C.I., Tissot, C., 1977. L'étude microscopique de la matière organique des sédiments quaternaires de mer de Norvège. *Géochimie organique des sédiments marins profonds*, mer de Norvège, Eds CNRS.
- Combaz, A., 1980. Les kérogènes vus au microscope. Dans *Kerogen*, B. Durand (Eds), Technips, Paris, 55-111.
- Combes, F., Hurand, A. and Meunier, M., 1995. La forêt de montagne : un remède aux crues. *Compte rendu de recherches* 3, BVRE de Draix. Cemagref Editions, 113-121.
- Comont, L., Laggoun-Defarge, F., Disnar, J.R., 2006. Evolution of organic matter indicators in response to major environmental changes: The case of a formerly cut-over peat bog (Le Russey, Jura Mountains, France). *Organic Geochemistry* 38(12), 1736-1751.
- Copard, Y., 2002. Altération diagénétique et post-diagénétique (thermicité, oxidation) des charbons carbonifères du Massif Central français (Saint Etienne, Graissessac et autres lieux). Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 306p.
- Copard, Y., Di-Giovanni, C., Martaud, T., Albéric, P., Olivier, J.E., 2006. Using Rock-Eval 6 pyrolysis for tracking fossil organic carbon in modern environments: implications for the roles of erosion and weathering. *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 135-153.
- Copard, Y., Amiotte-Suchet, P. Di-Giovanni, C., 2007. Storage and release of fossil organic carbon related to weathering of sedimentary rocks. *Earth and Planetary Science Letters* 258, 345-357.
- Cras, A., 2005. Etude de la dynamique de fonctionnement hydrologique des bassins versants torrentiels marneux. Apports du traçage naturel. Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon, 161 p.
- Crosaz, Y., 1995. Le matériel végétal : un outil pour la protection des sols. *Compte rendu de recherches* 3, BVRE de Draix. Cemagref Editions, 225-236.

D-

- Da Costa Gurgel, M.H., 2008. La sédimentation organique associée à deux systèmes d'upwelling en Amérique du Sud tropicale : implications paléocéanographiques et paléoclimatiques au cours de l'Holocène. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 332p.
- Dai, A., Fung, I.Y., 1993. Can Climate Variability Contribute to the "Missing" CO₂ Sink? *Global Biogeochemical Cycles*, 7(3), 599–609.
- Daniau, A.L., 2008. Variabilité des incendies en Europe de l'Ouest au cours du dernier cycle climatique : relations avec le climat et les populations Paléolithiques. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I.
- Dedieu, G., 1997, The global carbon cycle and the terrestrial biosphere. *Bulletin des Sciences Géologiques* Tome 50, fascicule 1-4. Université de Strasbourg.
- Degens, E.T., Kempe, S., Richey, J.E., 1991. Biogeochemistry of major world rivers, in *Biogeochemistry of major world rivers* Degens, E.T., Kempe, S., Richey, J.E. (Eds), SCOPE 42, pp 323-344.
- Descroix, L., 1998. L'érosion hydrique dans les terrains peu résistants des Préalpes françaises du sud Mesures et variables explicatives sur parcelles et bassins-versants. *Revue de géographie alpine*, 1, 43-58.
- Dickens, A.F., Gélinais, Y., Hedges, J.I., 2004a. Physical separation of combustion and rock sources of graphitic black carbon in sediments. *Marine Chemistry*, 92(1-4), 215-223.
- Dickens, A.F., Gélinais, Y., Hedges, J.I., 2004b. Reburial of fossil organic carbon in marine sediments. *Nature* 427, 336-339.
- Di-Giovanni, C., 1994. Production, flux et stocks de matière organique dans un système limnologique basique au cours du Post-glaciaire: le bassin de Chaillexon (Doubs, France). Thèse de l'Université de Bourgogne, 305 p.
- Di-Giovanni, C., Bertrand, Ph., Campy, M., Disnar, J.R., 1997. Contribution de matière organique méso-cénozoïque dans un flux organique terrigène tardi et post-glaciaire (bassin de Chaillexon, Doubs, France). *Bull. Soc. Géol. France*, 168, 553-559.
- Di-Giovanni, C., Disnar, J.R., Bichet, V., Campy, M., 1998a. Sur la présence de matière organique méso-cénozoïque dans les humus actuels (bassin de Chaillexon, Doubs, France). *C.R.Acad. Sciences Paris*, 326, 553-559.
- Di-Giovanni, C., Disnar, J.R., Bichet, V., Campy, M., Guillet, B., 1998b. Geochemical characterization of soil organic matter and variability of a past glacial detrital organic supply (Chaillexon lake, France). *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 1057-1069.
- Di-Giovanni, C., Disnar, J.R., Campy, M., Macaire, J.J., 1999a. Variability of the ancient organic supply in modern humus. *Analisis* 27(5), 398-402.
- Di-Giovanni, C., Disnar, J.R., Turpin, S., Bréheret, J.G., 1999b. Estimation de la contribution des matières organiques remaniées au stock organique des sols et sédiments lacustres (bassin des Peyssiers, hautes Alpes, France). *Bulletin de la Société Géologique de France* 170, 121-129.
- Di-Giovanni, C., Disnar, J.R., Campy, M., 1999c. Des particules charbonneuses, témoins des variations de l'érosion chimique d'un bassin versant calcaire durant l'Holocène (bassin de Chaillexon, Doubs, France). *C.R. Acad. Sciences Paris*, 328, 167-172.
- Di-Giovanni, C., Disnar, J.R., Bakyono, J.P., Keravis, D., Millet, F., Olivier, J.E., 2000. Application de l'étude de la matière organique à l'analyse de l'érosion : exemple du bassin versant du Moulin, dans les terres Noires des Alpes de Haute Provence, France. *C.R. Acad. Sciences Paris*, 331, 7-14.
- Di-Giovanni, C., 2000. Flux de matières organiques fossiles dans les géosystèmes continentaux actuels: intérêts pour la connaissance du cycle du carbone organique et pour l'étude de l'érosion des surfaces continentales. Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches. Univ. Tours, 75 p. + annexes.
- Di-Giovanni, C., Disnar, J.R., Macaire, J.J., 2002. Estimation of the annual yield of organic carbon released from carbonates and shales by chemical weathering. *Global and Planetary Change* 32, 327-343.
- Disnar, J.R., Guillet, B., Keravis, D., Di-Giovanni, C., Sebag, D., 2003. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis : scope and limitations. *Organic Geochemistry* 34, 327-343.

- Disnar, J.R., Jacob, J., Morched-Issa, M., Lottier, N., Arnaud, F., 2008. Assessment of peat quality by molecular and bulk geochemical analysis: Application to the Holocene record of the Chautagne marsh (Haute Savoie, France). *Chemical Geology* 254, (1-2), 101-112.
- Dobremez, J.F., Machet, J.E., 1997. Histoire de l'occupation des sols, cycles du carbone et biodiversité dans la Réserve naturelle du Plan de Tueda (Savoie, France) - Les enjeux de la gestion. *Revue de Géographie Alpine*, 3, 27-37.
- Dow, W.-G., 1977. Kerogen studies and geological interpretations. *J. Geochem. Explor.*, 7: 79-99.
- Drenzel, N.J., Monluçon, D.B., Yunker, M.B., Macdonald, R.W., Eglinton, T.I., 2007. Constrains on the origin of sedimentary organic carbon in the Beaufort Sea from coupled molecular, ^{13}C and ^{14}C measurements. *Marine Chemistry*, 103, 146-162.
- Duchauffour, P., 2001. Introduction à la science du sol; végétation, environnement. 6th eds, Dunod, Paris.
- Duvignaud, P., 1980. La synthèse écologique. Ed Doin, Paris, 380 p.

E-

- Eglinton, T.I., Benitez-Nelson, B.C., Pearson, A., McNichol, A.P., Bauer J.E., Druffel, E.R.M., 1997. Variability in Radiocarbon Ages of Individual Organic Compounds from Marine Sediments. *Science* 277, (796), DOI: 10.1126/science.277.5327.796.
- Espitalié, J., Laporte, J.L., Madec, M., Marquis, F., Leplat, P., Paulet, J., Boutefeu, A. ; 1977. Méthode rapide de caractérisation de roches-mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* 32, 23-43.
- Espitalié, J., Deroo, G., Marquis, F., 1985. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications, Partie 1-2. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* 40(5), 563-579.
- Eswaran, H., Van Den Berg, E., Reich, P., 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal* 57, 192-194.

F-

- Fike, D.A., Grotzinger, J.P., Pratt, L.M., Summons, R.E., 2006. Oxidation of the Ediacaran ocean. *Nature* 444, 744-747.
- Fournier, L., 2004. Modélisation de la production des apports sédimentaires dans le bassin versant de la Durance. Rapport de DEA, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud.

G-

- Gadel, F., Ragot, J.P. 1973. Sur l'allochtonie de la fraction organique particulaire des dépôts quaternaires récents du Golfe du Lion. *Advances in Organic Geochemistry. Technips*, Paris, 619-628.
- Gallaud, A., 2008. Interaction Orogenèse – Climat – Erosion en Asie Centrale durant le Cénozoïque : L'impact de la surrection de la chaîne du Tianshan sur le climat dans le bassin du Junggar. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 378p.
- Galy, V., Beyssac, O., France-Lanord, C., Eglinton, T., 2008. Recycling of Graphite During Himalayan Erosion: A Geological Stabilization of Carbon in the Crust. *Science*, 322, 943 -945.
- Garrel, R.M., Mackensie, F.T., 1971. Evolution of sedimentary rocks. W. W. Norton & Co. Inc., New York, 397 p.
- Gidon, M., 1977. Carte géologique simplifiée des Alpes occidentales, du Léman à Digne, au 1/250.000°. Eds DIDIER & RICHARD et B.R.G.M., une carte en deux feuilles et une notice de 18 p. & 2 pl.

- Groot, J.J., Groot, C.R., 1971. Horizontal and vertical distribution of pollen and spores in quaternary sequences. In Funnel B.M. and Riedel W.R. (eds), *The micropaleontology of oceans*, Cambridge University Press, pp. 493-504.
- Groot, J.J., Groot, C.R., Ewing, M., Burckle, L., Connolly, J.R., 1967. Spores, pollen, diatoms and provenance of the Argentine basin sediments. *Progress in Oceanography*, 4, pp. 179-217.
- Gomez, B., Trustrum, N.A., Hicks, D.M., Rogers, K.M., Page, M.J., Tate K. R., 2003. Production, storage, and output of particulate organic carbon: Waipaoa River basin, New Zealand. *Water Resources Research*, 39(6). 6, 1161, doi:10.1029/2002WR001619.

H-

- Harrison, K., Broecker, W., 1993. A strategy for estimating the impact of CO₂ fertilization on carbon storage. *Global Biogeochemical Cycles* 7(1), 69-80.
- Hart, G., Pasley, M.A., Gregory, W.A., J.H.-F., 1994. Particulate organic matter, maceral facies models, and applications to sequence stratigraphy. Dans *Sedimentation of organic particles*. A. Traverse (ed), Cambridge University Press. 337-390.
- Hetényi, M., Nyilas, T., Tóth, T.M., 2005. Stepwise rock-eval pyrolysis as a tool for typing heterogeneous organic matter in soils. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 74 (1-2), 45-54.
- Hilton, R.G., Galy, A., Hovius, N, 2008. Riverine particulate organic carbon from an active mountain belt: Importance of landslides. *Global Biogeochemical Cycles* 22, GB1017, doi:10.1029/2006GB002905,
- Holland, H.D., 1978. *The Chemistry of Atmosphere and Oceans*. Wiley Interscience Publishers.
- Houghton, R.A., 1991. Tropical deforestation and atmospheric carbon dioxide. *Climatic change* 19, 99-118.
- Houghton, R.A., 1998. Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance. *Global Biogeochemical Cycles* 12(1), 25-34.

I-

- IPCC, 1992. *Climate Change, the Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Houghton, J.T., Callendar, B.A., Varney, S.K. (Eds), Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- IPCC, 1993. *International handbook of Coal petrology*, 3ème supplément à la 2ème, CNRS (Eds).
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001, The Scientific Basis*. the Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van der Linden P. J., Xiaosu D. (Eds.), Cambridge University Press, UK.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Salomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, L., Averyt, K., Tignor, M., Leroy-Miller, H., Zhenlin C., (Eds). Cambridge University Press.
- IRS 2001. *Etude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône*. Institution interdépartementale des bassins Rhône-Saône (Eds), Valence.

J-

- Jacob. J., 2003. *Enregistrement des variations paléoenvironnementales depuis 20000 ans dans le Nord Est du Brésil (lac Caço) par les triterpènes et autres marqueurs organiques*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 290p.

K-

- Kao, S.J., Liu, K.K., 1996. Particulate organic carbon export from a subtropical mountainous river (Lanyang Hsi), in Taiwan. *Limnol. Oceanogr.* 41, 1749-1757.
- Kasting, J.F., 1993. Earth's early atmosphere. *Science* 259, 920-926.
- Kasting, J.F., 2004. When methane made climate. *Scientific American*, 291(1), 78-85.
- Kaufmann, R.K., Stock, J.H., 2003. Testing hypotheses about mechanisms for the unknown carbon sink: a time series analysis. *Global Biogeochemical Cycles* 17(2), 1072. DOI: 10.1029/2002GB001962.
- Keller C. K., et Bacon D. H., 1998. Soil respiration and georespiration distinguished by transport analyses of vadose CO₂, ¹³CO₂, and ¹⁴CO₂. *Global biogeochemical cycles*, 12(2), 361-372.
- King, A.W., W.R. Emanuel., S.D. Wullschlegel., W.M. Post., 1995. In search of the missing carbon sink: A model of terrestrial biospheric response to land-use change and atmospheric CO₂. *Tellus* 47, 501-519.
- Klotz, S., Mathys, N., Olivier, J.E, 2005. *Annuaire de l'ORE Draix 2005*. Document Cemagref.
- Komada, T., Druffel, E.R.M., Hwang; J., 2005. Sedimentary rocks as sources of ancient organic carbon to the ocean: An investigation through $\Delta^{14}\text{C}$ and $\delta^{13}\text{C}$ signatures of organic compound classes. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB2017, doi: 10.1029/2004GB002347.
- Kump, L.R., Kasting, J.F., Crane, R.G., 1999. *The earth system*. Upper Saddle River, New Jersey : Prentice-Hall, Inc.

L-

- Lafargue, E., Marquis, F., Pilot, D., 1998. Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production and soil contamination studies. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* 53(4), 421-437.
- Lallier-vergès, E., Sifeddine, A., de Baulieu, J.L., Reille, M., Tribouvillard, N., Bertrand, P., Mongenot, T., Thouveny, N., Disnar, J.R., Guillet, B., 1993. The lacustrine organic sedimentation as a response to the late Wurmian and Holocene climatic variations, lac du Bouchet (haute Loire, France). *Bulletin de la société Géologique de France*, 164(5), 661-673.
- Lallier-Vergès, E., Martinez, P., Bertrand, P., Keravis, D., 1998. Sedimentation, reworking and preservation of organic matter in surficial sediments of the N-W African upwelling system. *Mineral. Mag.*, 62A, 846-847.
- Léonard, J.P., 2004. Sociétés et espaces arborés dans le Midi méditerranéen. *forêt méditerranéenne*, XXV (3), 173-190.
- Leithold, R.L. et Blair, N.E., 2001. Watershed control on the carbon loading of marine sedimentary particles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65 (14), 2231-2240.
- Leithold, E.L., Blair, N.E., Perkey, D.W., 2006. Geomorphologic controls on the age of particulate organic carbon from small mountainous and upland rivers. *Global Biogeochemical Cycles* 20, GB3022, doi:10.1029/2005GB002677,
- Lichtfouse, E., Bardoux, G., Mariotti, A., Balesdent, J., Ballentine, D.C., Mack, S.A., 1997a. Molecular ¹³C and ¹⁴C evidence for the allochthonous and ancient origin of C₁₆-C₁₈ n-alkanes in modern soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 1891-1898.
- Lichtfouse, E., Budzinski, E., Garrigues, P., Eglinton, T.I., 1997b. Ancient polycyclic aromatic hydrocarbons in modern soils: ¹³C, ¹⁴C and biomarkers evidence. *Org. Geochem.* 26, 353-359.
- Lin, R.G., 1988. Etude du potentiel de dégradation de la matière organique particulaire au passage eau douce – eau salée : cas de l'estuaire de la Gironde. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, 209p.
- Lowe, D.R., Tice, M.M., 2004. Geologic evidence for Archean atmospheric and climatic evolution: Fluctuating levels of CO₂, CH₄, and O₂ with an overriding tectonic control. *GEOLOGY*, 32(6), 493-496.
- Ludwig, W., Probst, J.L., Kempe, S., 1996. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles* 10(1), 23-41.

Ludwig, W., 2001. The age of river carbon. *Nature, News and views*, 409, 466-467.

Lückge, A., Boussafir, M., Lallier-Verges, E., Littke, R., 1999. Comparative study of organic matter preservation in immature sediments along the continental margins of Peru and Oman. Part I: Results of petrographical and bulk geochemical data. *Organic Geochemistry*, 24(4), 437-451.

M-

Maquaire, O., Ritzenthaler, A., Fabre, D., Ambroise, B., Thiery, Y., Truchet, E., Malet, J.P., Monnet, J., 2002. Caractérisation des profils de formations superficielles par pénétrométrie dynamique à énergie variable : application aux marnes noires de Draix (Alpes de-Haute-Provence, France): Characterisation of alteration profiles using dynamic penetrometry with variable energy. Application to weathered black marls, Draix (Alpes-de Haute-Provence, France). *Comptes Rendus Geosciences*, 334(11): 835-841.

Marchand, C., Lallier-Vergès, E., Disnar, J.R., Kéravis, D., 2008. Organic carbon sources and transformations in mangrove sediments: A Rock-Eval pyrolysis approach. *Organic Geochemistry* 39 (4), 408-421.

Masiello, C.A. et Druffel, E.R.M., 2001. Carbon Isotope Geochemistry of the Santa Clara River. *Global Biogeochemical Cycles* 15(2), 407-416.

Mathys, N., Brochot, S., Meunier, M., 1996. L'érosion des Terres Noires dans les Alpes du Sud : contribution à l'estimation des valeurs annuelles moyennes (bassins versants expérimentaux de Draix, Alpes de Haute-Provence). *Revue de géographie alpine*, tome 1984, 2, pp. 17-27.

Mathys, N., Brochot, S., Meunier, M. and Richard, D., 2003. Erosion quantification in the small marly experimental catchments of Draix (Alpes de Haute Provence, France). Calibration of the ETC rainfall-runoff-erosion model. *CATENA*, 50(2-4), 527-548.

Mathys, N., 2006. Analyse et modélisation à différentes échelles des mécanismes d'érosion et de transport de matériaux solides. Cas des petits bassins versants de montagne sur marnes (Draix, Alpes de Haute Provence). Thèse de doctorat, institut nationale polytechnique de Grenoble, 346 p.

Meunier, M., Mathys, N. and Cambon, J.P., 1995. Panorama synthétique des mesures d'érosion effectuées sur trois bassins du site expérimental de Draix. *Compte rendu de recherches 3, BVRE de Draix. Cemagref Editions*, 125-140.

Meybeck, M., 1982. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science*, 282, 401-450.

Meybeck, M., 1993a. Riverine transport of atmospheric carbon: sources, global typology and budget. *Water, Air, and Soil Pollution*, 70, 443-463.

Meybeck, M., 1993b. C,N,P, and S in rivers: from sources to global inputs. In Wollast, Machenzie and Chou (eds.) "interaction of C,N,P, and S biogeochemical cycles on Global Change." Springer Verlag, 163-193.

Meybeck, M., 2005. origins and behaviours of carbon species in world rivers. In: Roose and Lal (Eds.). *Erosion and Carbon Dynamics, Advances in Soil Sciences Series, CRC Boca Raton*, 209-238.

Meyers, P., et Lallier-Verges, E., 1999. Lacustrine Records of Changes in Late Quaternary Continental Environments and Climates: An overview of sedimentary Organic Matter Indicators. *Journal of PaleoLimnology* 21, 345-372.

Milliman, J.D. et Syvitsky, J.P.M., 1992. Geomorphic/Tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *The journal of geology*, 100, 525-544.

Miramont, C., 1998. Morphogénèse, activité érosive et détritisme alluvial holocènes dans le bassin de la moyenne Durance. Thèse de doctorat, Université d'Aix Marseille I, 296p.

Moran, J.E., Fehn, U., Teng, R.T.D., 1998. Variations in $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratios in recent marine sediments: evidence for a fossil organic component. *Chemical Geology*, 152(1-2), 193-203.

N-

- Noel, H., 2001. Caractérisation et calibration des flux organiques sédimentaires dérivant du bassin versant et de la production aquatique (Annecy, le Petit Lac)- Rôles respectifs de l'Homme et du Climat sur l'évolution des flux organiques au cours des 6000 dernières années. Thèse de doctorat. Université d'Orléans, 279p.
- Nzoussi P., Copard, Y., Disnar, J.R., 2005. Recycled vitrinites: diagnostic criteria and thermal evolution. *International. Journal of Coal Geology*, 61, 223-239.

O-

- Olivier, J.E. et Juge, M., 1995. Matériel de mesure de matières en suspension : préleveur d'échantillon et capteur de pression différentielle. Test et étalonnage en canal. *Compte-rendu de recherches n° 3, BVRE de Draix*. Cemagref Editions, 43-61.
- Olivier, J.E. et Pebay- Peyroula J.C., 1995. L'Ellan, un limnigraphe adapté aux mesure en conditions difficiles. *Compte-rendu de recherches n° 3, BVRE de Draix*. Cemagref Editions, 13-24.
- Olivier, J.-E., 1999. Les fortes crues d'août 1997 à Draix : d'un printemps sec à des records de charges solides. Dans : *Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne*. Cemagref Editions, Draix, Le Brusquet, Digne, 11-28.
- Olivry, J.C., Hoorelbeck, J., 1990. Erodabilité des terres noires de la vallée du Buëch (France, Alpes du Sud). *Cah. ORSTOM, ser. Pédot., vol. XXV(1-2) : 95-110*
- Otto, A., Simoneit, B.R.T., 2001. Chemosystematics and diagenesis of terpenoids in fossil conifer species and sediment from the Eocene Zeitz formation, Saxony, Germany. *Geochimica and Cosmochimica Acta* 65, 3505-3527.

P-

- Pelet, R., 1980. Evolution géochimique de la matière organique. Dans *Kerogen, B. Durand (Eds), Technips, Paris, 475-499*.
- Petsch, S.T., Berner, R.A., Eglinton, T.I., 2000. A field study of the chemical weathering of ancient sedimentary organic matter. *Organic Geochemistry* 31, 475-487.
- Petsch, S.T., Smernik, R.J., Eglinton, T.I., Oades, J.M., 2001a. A solid state ^{13}C -NMR study of kerogen degradation during black shale weathering. *Geochim. Cosmochim. Acta* 65, 1867– 1882.
- Petsch, S.T., Eglinton, T.I., Edwards, K.J., 2001b. ^{14}C -dead living biomass: evidence for microbial assimilation of ancient organic carbon during shale weathering. *Science* 292, 1127– 1131.
- Petsch, S.T., Edwards, K.J., Eglinton, T.I., 2003. Abundance, distribution and $\delta^{13}\text{C}$ analysis of microbial phospholipid-derived fatty acid in a black shale weathering profile. *Org. Geochem.* 34, 731– 743.
- Petsch, S.T., Edwards, K.J., Eglinton, T.I., 2004. Microbial transformations of organic matter in black shales and implications for global biogeochemical cycles. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 219;157– 170.
- Pichard, G., 2001. L'ESPACE ABSORBÉ PAR L'ÉCONOMIQUE ? Endettement communautaire et pression sur l'environnement en Provence (1640-1730). *Histoire et Sociétés Rurales*, 16, 81-115.
- Probst, J.L., 1992. Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale, Mécanismes, bilan global actuel et fluctuation au cours des 500 derniers millions d'années. *Mémoire des Sciences Géologiques* 94. Université de Strasbourg.

Q - R-

- Ramanampisoa, L., Disnar J.R., 1994. Primary control of paleoproduction on organic matter preservation and accumulation in the Kimmeridge rocks of Yorkshire (UK). *Organic Geochemistry*, 21, 1153-1167.
- Raven, J.A., 1983. Physiological correlates of the morphology of early vascular plants. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 88 (1-2), 105-126.
- Raymond, P.A., Bauer, J.E., 2001. Riverine export of aged terrestrial organic matter to the North Atlantic Ocean, *Nature* 409, 497-500.
- Raymond, P.A., Bauer, J.E., 2004. Controls on the variability of organic matter and dissolved inorganic carbon ages in northeast US rivers. *Marine Chemistry*, 92, (1-4), 353-366.
- Rey, F., 2002a. Influence de la distribution spatiale de la végétation sur la production sédimentaire de ravines marneuses dans les Alpes du sud. Thèse de doctorat, Université de Grenoble I, 194 p.
- Rey, F., Robert, Y., Vento, O., 2002b. Influence de la végétation forestière sur la formation de dépôts sédimentaires en terrain marneux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, 85-92.
- Rey, F., 2003. Influence of vegetation distribution on sediment yield in forested marly gullies. *Catena*, 50(2-4), 549-562.
- Rey, F., Abraham, A., Gallicher-Lavanne, C., Burylo, M., Eugène, R.E., Mermin, E., Puech, C., 2007. Etude de la faisabilité d'une opération de réhabilitation écologique de ravines marneuses érodées pour la rétention durable des sédiments à l'échelle du bassin versant de la Durance. Plan Durance Mully-usages, action 8 : expérimenter le contrôle de l'érosion des versants de marnes noires. Rapport final.
- Riboulleau, A., 2000. Géochimie des black shales du Jurassique supérieur de la plate-forme russe. Processus de sédimentation et de préservation de la matière organique. Thèse de doctorat, Université Paris VI.
- Richard, D., Mathys, N., 1999. Historique, contexte technique et scientifique de BRVE de Draix. Caractéristiques, données disponibles et principaux résultats acquis au cours de dix ans de suivi. Actes du séminaire, Draix Le Brusquet Digne, 22-24 octobre 1997. Cemagref Editions, Antony, 11-28.
- Robert, P., 1980. The optical evolution of Kerogen and geothermal histories applied to oil and gas exploration. Dans *Kerogen*, B. Durand (Eds), Technips, Paris, 385-414.
- Rodin, L.E., Bazilevic, N.I., 1966. The biological productivity of the main vegetation types in the Northern hemisphere of the old World. *Forestry Abstr.*, 1966, 27, 3, 369-372.
- Rodier, J., 1996. L'analyse de l'eau; eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer, 8^{ème} édition, Dunod (EDs), Paris, 1383p.
- Ronov, A.B. et Yaroshevskiy, A.A., 1976. A new model for the chemical structure of the earth crust. *Geochem. Internat.*, 13, 1761-1795.
- Rotaru, M., Gaillardet, J., Steinberg, M., Trichet, J., 2006. Les climats passés de la terre. Eds Vuibert, Paris.

S-

- Sarmiento, J.L., Sundquist, E.T., 1992. Revised budget for the oceanic uptake of anthropogenic carbon dioxide. *Nature* 356, 589- 593.
- Schimel, D.S., 1994. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology* 1(1), 77-91.
- Schlünz, B., Schneider, R.R., 2000. Transport of terrestrial organic carbon to the oceans by rivers: re-estimating flux- and burial rates. *Int Journ Earth Sciences*. 88, 599-606.
- Sebag, D., Di Giovanni, C., Ogier, S., Mesnage, V., Laggoun-Défarge F., Durand, A., 2005. Inventory of sedimentary organic matter in modern wetland (Marais Vernier, Normandy, France) as source-indicative tools to study Holocene alluvial deposits (Lower Seine Valley, France). *International Journal of Coal Geology* 67, 1-16.

- Sebag, D., Copard, Y., Di-Giovanni, C., Durand, A., Laignel, B., Ogier, S., Lallier-Verges, E., 2006. Palynofacies as useful tool to study origins and transfers of particulate organic matter in recent terrestrial environments: Synopsis and prospect. *Earth-Science Reviews* 79, 241-259.
- Sifeddine A., Laggoun-Défarge F., Lallier-vergès, E., Disnar J. R.; Williamson, D., Gasse, F., Gibert, E., 1995. La sédimentation organique lacustre en zone tropicale sud au cours des 36000 dernières années (Lac Tritrivakely, Madagascar) = Lacustrine organic sedimentation in the southern tropical zone in the last 36 kyears (Lake Tritrivakely, Madagascar). *C.R. Acad. Sciences Paris*, 321(5), 385-391.
- Sifeddine A., Bertrand, P., Lallier-vergès, E., Patience A. J., 1996. Lacustrine organic fluxes and palaeoclimatic variations during the last 15 ka: Lac du bouchet (Massif Central, France). *Quaternary Science Reviews* 15, 2003-211).
- Sifeddine, A., de Baulieu, J.L., Reille, M., Tribouvillard, N., Mongenot, T., Thouveny, N., Disnar, J.R., Guillet, B., 1993
- Simonneau, A., 2009. Reconstitution des changements environnementaux en altitude dans le massif des Grandes Rousses (Alpes Occidentales) à partir de l'analyse pluridisciplinaire de la sédimentation organique holocène dans les remplissages sédimentaires des lacs proglaciaires de Bramant et Blanc Huez. Master Géotransfer. Université d'Orléans.
- Simonnet, J.P., Richy, P., Pardon, C., 1995. Contribution à l'étude des mécanismes et bilans de l'érosion chimique des Terres noires du bassin de la Durance: exemple des bassins représentatifs expérimentaux de Draix (nord-est de Digne). *Compte rendu de recherches n°3 en érosion et hydraulique torrentielle*, Cemagref Editions, Antony, 189-199.
- Sobalik, Z., et Cejka, J., 1996. Continuous monitoring of the oxidation of different types of organic matter in a heated (190°C) FTIR flow cell. Dans *Weathering of Fossil Organic Mater*, Kribek (Eds), Czech Geological Survey, Prague.
- Stallard, R.F., 1998. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial. *Global Biochemical Cycles*, 12(2) 231-257.
- Steinmann, P., Huon, S, Roos-Barraclough, F., Föllmi, K., 2006. A peat core based estimate of Late-glacial and Holocene methane emissions from northern peatlands. *Global and Planetary Change*, 3 (4), 233-239.

T-

- Tans, P.P., Fung, I.Y., Takahashi, T., 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science* 247, 1431-1438.
- Tissot, B., et Welte, D.H., 1984. Petroleum formation and occurrence. Second Revisited and enlarged edition. Springer-verlag, Berlin, Heidelberg, New York Tokyo.
- Trumbore, S.E., et Druffel; E.R.M., 1995. Carbon isotopes for characterizing sources and turnover of nonliving organic matter. Zepp, R.G., Sonntag, C., (Eds), Wiley.
- Truswell, E.M Drewry, D.J., 1984. Distribution and provenance of recycled palynomorphs in surficial sediments of the Ross sea, Antarctica. *Marine Geology*, 59, 187-214.
- Tyson, R.V., 1995. Sedimentary organic matter : organic facies and palynofacies. Chapman et Hall, London.

U-V-

- Valdés, J.R., Sifeddine, A., Lallier-Verges, E., 2004. Petrographic and geochemical study of organic matter insurficial laminated sediments from an upwelling system (Mejillones del Sur Bay, Northern Chile). *Organic Geochemistry* 35(7), 881-894.
- Vallauri, D., 1997a. Dynamique de la restauration forestière des substrats marneux avec *Pinus nigra* J.F. Arnold ssp. *nigra* dans le secteur haut-provençal : trajectoires dynamiques, avancement du processus de restauration et diagnostic sur l'intégrité fonctionnelle des écosystèmes recréés. Thèse de doctorat, Université de Marseille III, 300 p.

Vallauri, D., Vincent, P., 1997b. Histoire de l'occupation de l'espace au XIXème siècle dans les bassins expérimentaux du Saignon, du Brusquet et du Laval (Alpes-de-Haute-Provence). Acte du séminaire «Les bassins versants expérimentaux de Draix laboratoire d'étude de l'érosion en montagne », 22-24 octobre 1997, Cemagref éditions.

Vanierre, B., 2001. Feu, agro-pastoralisme et dynamiques environnementales en France durant l'Holocène. Analyse du signal incendie, approches sédimentologiques et études de cas en Berry, Pyrénées et Franche-Comté. Thèse de doctorat, Institut national agronomique Paris-Grignon, Paris, France.

Vernal, A., Larouche, A., Richard, J.H., 1987. Evaluation of palynomorph concentrations : do the aliquot and the marker-grain methods yield comparable results ? Pollen and Spores, XXIX (2-3), 291-304.

W-

Wakeham, S.G., Forrest, J., Masiello, C., Gaelinas, Y., Alexander, C., leavitt, P., 2004. Hydrocarbons in Lake Washington Sediments. A 25-Year Retrospective in an Urban Lake. Environ. Sci. Technol. 38, 431-439.

Watson, R.T., Rodhe, H., Oeschger, H., Siegenthaler, U., 1990. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, UK.

Watson, R.T., Noble, I.R., Bolin, B., Ravindranath, N.H., Verardo, D.J., Dokken, D.J., 2000. IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change And Forestry. Cambridge University Press, UK.

X-Y-Z-

Yamaguchi, K.E., 2003. Evolution of the atmospheric oxygen in the early Precambrian: an updated review of geological "evidences". Frontier Research on Earth Evolution, vol 2.

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I-1 : Le cycle global du carbone (Kump, Kasting et Crane, 1999).	20
Figure I-2 : Le cycle du carbone organique (Kump, Kasting et Crane, 1999).	21
Figure I-3 : Evolution des concentrations atmosphériques en CO ₂ , O ₂ et CH ₄ au cours des temps géologiques (Kasting, 2004).	22
Figure I-4 : Représentation schématique des compartiments et flux pris en compte par les modèles GEOCARB (Berner, 2003a).	23
Figure I-5: Evolution des teneurs en CO ₂ atmosphérique rapportées à l'actuel (RCO ₂) durant le Phanérozoïque selon les modèle GEOCARB II et III. Les courbes en trait plein représentent l'incertitude des modèles (Berner, 2001).	24
Figure I-6 : Taux d'enfouissement du carbone organique au cour du Phanérozoïque : - estimation GEOCARB (noir).- estimation à partir de la concentration en carbone organique des roches à travers le monde (blanc) (Berner, 2001).	25
Figure I-7 : Palynofacies observés au sein d'un échantillon de sédiment de mer de Norvège datant de l'Holocène. Mélange de constituants contemporains de la sédimentation et d'éléments remaniés plus ou moins anciens (Combaz in Durand, 1980)	27
Figure I-8: Ages ¹⁴ C (BP) des différents composants de la matière organique des sédiments de la mer Noire (A), et Arabique (B) (Eglinton et al, 1997), (Eglinton et al, 1997).	30
Figure I-9: Δ ¹⁴ C et δ ¹³ C ‰ du COP de six rivières affluentes de l'Hudson en fonction de la nature des roches mères (shales ou cristallines) (Raymond et Bauer 2004).	32
Figure I-10: Minéralisation du COF le long de profils d'altérations de « black shales » (Petsch et al, 2000).	33
Figure I-11: Relation entre la concentration en MO des roches avec la proportion de MOF au sein de la MO des sols sus-jacents.	32
Figure I-12: Contribution fossile au sein des compartiments, roches (mélange) sols, particules fluviales et sédiments marins (Shelf-slope). (Blair et al, 2003).	36
Figure I-13: Contribution fossile (Kerogen) au sein des flux de COP des rivières Siuslaw, Noyo, Navarro, Eel, Waipaoa et Waipuu (Leithold et al, 2006).	37
Figure I-14 : Comparaison entre les teneurs en Corg de la charge solide (POC -% TSS) avec la densité de cette charge (TSS en mg/L) (Meybeck, 2005).	39
Figure I-15 : Stock de COF estimé dans le premier mètre de roches sédimentaires dans le monde (Copard et al, 2007).	40
Figure I-16 : COF libéré annuellement par l'altération chimique des Roches dans le monde (Copard et al, 2007).	
Figure I-17 : Stratégie du présent travail.	45

Chapitre II :

Figure II-1: Bassin versant simplifié de la Durance.	50
Figure II-2 : Paysage fortement marqué par l'érosion, appelé « badlands », sur terres noires Callovo-Oxfordienne, à proximité de village de Draix (Cliché Y Graz).	51
Figure II-3: Localisation des bassins versants de Draix (Mathys, 2006).	52
Figure II-4 : Positionnement des bassins versants de Draix.	52
Figure II-5 : Pluies mensuelles de l'année 2005 et valeurs moyennes de 1984 à 2005 pour la station du Laval (Klotz et al, 2005).	53
Figure II-6 : Altération des roches par cryoclastie sur le site de Draix (Cliché J.R. Disnar).	53
Figure II-7 : Carte géologique simplifiée de la région de Draix (Gidon, 1977).	54
Figure II-9 : Contexte géologique des bassins versants de Draix.	55
Figure II-10 : Drapage de l'orthophotographie sur le MNT du Laval et du Moulin (Mathys, 2006).	56
Figure II-11 : Carte de végétation du Laval (Mathys, 2006).	57
Figure II-12 : Formations géologiques du Laval (Mathys, 2006).	57
Figure II-13 : Zone aval du bassin versant du Brusquet (cliché, Y Graz).	58
Figure II-14 : Carte de végétation du Brusquet (Vallauri, 1997).	58
Figure II-15 : Formations géologiques du Brusquet.	58
Figure II-16 : Bassin versant du Moulin, vue générale (Mathys, 2006).	59
Figure II-17 : Carte de végétation du Moulin (Mathys, 2006).	59
Figure II-18 : Formations géologiques du Moulin (Mathys, 2006).	60
Figure II-19 : Vue par le nord du bassin de la Roubine (Mathys, 2006).	60
Figure II-20 : Dispositifs de mesures du bassin du Laval (Richard et Mathys, 1999).	63
Figure II-21: Localisation des échantillons prélevés dans le bassin du Laval.	65
Figure II-22: Différents horizons de sols observés sur le site de Draix.	66
Figure II-23: Ravine élémentaire où les profils A-LAV1, A-LAV2 et A-LAV3 ont été prélevés (cliché J.E. Olivier).	67
Figure II-24 : Profil A-LAV1 (cliché J.E. Olivier).	67
Figure II-25 : Profil A-LAV2 (cliché J.E. Olivier).	68
Figure II-26 : Profil A-LAV3 (cliché J.E. Olivier).	68
Figure II-27 : Localisation des profils 06- LA A et 06-LA S2 (cliché C. Di-Giovanni).	69
Figure II-28 : Profils 06-LA A et LA A R (cliché Y. Graz).	69
Figure II-29 : Profil 06 LA-S2 (cliché Y. Graz).	70
Figure II-30 : Localisation des échantillons prélevés dans le bassin du Brusquet.	72
Figure II-31: Profils d'altération A-BRV1 et A-BLAV1.	73
Figure II-32 : Localisation (a) des profils 06 BRU S1, BRU S1 Latet (b) des profils 06 BRU S3, BRU S3 Lat.	74
Figure II-33 : Profils d'altération 06-BRU S1 et BRU S1 Lat.	75
Figure II-34: Profils 06 BRU S3 et BRU S3 Lat.	76
Figure II-35 : Courbes d'émission et bornes d'intégration des paramètres de bases de la pyrolyse Rock-Eval (Behar et al, 2001).	83
Figure II-36 : Variation du $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ selon différentes formes de carbone (Trumblore et Druffel, 1995).	85

Chapitre III :

Figure III-1 : Particule de MO au sein d'une matrice de nature inconnue.	94
Figure III-2: Phases minérales et organiques observées par microscopie MET (échantillon 06-LA S2 PL 45 cm)	96
Figure III-3: Phases minérales et organiques observées par microscopie MET (échantillon 06-LA S2 PL 135 cm)	97
Figure III-4 : Diffractogrammes des échantillons BR4R2 (a) et T5 (b).	98
Figure III-5 : TOC des concentrés organique des échantillons L8to9 (roche toarcienne), T5, 06-LA S2 135cm (roches callovo oxfordiennes) et Br4R2 (roche aalénienne inférieure).	99
Figure III-6 : Experimental research site	105
Figure III-7 : Categories of particulate organic matter distinguished by their morphological criteria.	107
Figure III-8: Palynofacies counting (a) Palynofacies counting of the five bedrocks samples; (b) Palynofacies counting of soils profiles samples.	110
Figure III-9: Palynofacies counting of weathering profiles samples.	111
Figure III-10: Palynofacies counting of riverine particles samples.	112
Figure III-11: HI versus Tmax values of the studied samples.	114
Figure III-12 : n-alkanes abundance distribution (%) after pic areas integration and normalisation. (a) A-BRV1 samples and L8TO9 bedrock sample (Toarcian); (b) A-BLAV samples and Br-6R2 bedrock sample (upper-Aalenian).	116
Figure III-13: C/N versus $\delta^{13}\text{CPDB}\text{‰}$ values of the studied samples.	120
Figure III-14: Particules lignocellulosiques translucides (LCT), dégradées sombres (LCDs), et dégradées gélifiées (LCDG).	131
Figure III-15 : Particules lignocellulosiques opaques, allongées (LCOal), trapues (LCOtr), de formes complexes (LCOc), de formes conchoïdales (LCOconc), et fortement réfléchissantes (LCOtr).	133
Figure III-16: Particules amorphes, rougeâtres (MOAr), granulaires claires (MOAgc), opaques (MOAO), et gélifiées (AG).	135
Figure III-17 : Débris gélifiés (DG) et débris gélifiés opaques (DGO).	136
Figure III-18 : Eléments figurés, cuticules (Cut), spores et pollens (SO PO) et mycélium (Myc).	137
Figure III-19 : Particule de pyrite rhomboïdale.	138
Figure III-20 : Palynofacies observés dans les échantillons du profil A-LAV1.	139
Figure III-21 : Palynofacies observés dans les échantillons des profils 06-LA A et LA A R.	140
Figure III-22 : Palynofacies observés dans les échantillons du profil 06-LA S2, échantillons PL, TF horizons OL, OH et A.	142
Figure III-23 : Palynofacies observés dans les particules fluviatiles du bassin du Laval.	143
Figure III-24 : Rappel de la position des échantillons des profils 06-BRU-S1 et BRU S1 Lat.	144
Figure III-25 : Palynofacies observés dans les échantillons du profil 06-BRU S1, échantillons PL, TF, horizons OL et A.	145
Figure III-26 : Palynofacies observés dans les échantillons du profil BRU S1 Lat.	146
Figure IV- 27 : Rappel de la position des échantillons des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat.	147
Figure III-28 : Palynofacies observés dans les échantillons des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat, échantillons PL, TF, OL, OF, OH et A.	149
Figure III-29 : Palynofacies observés dans les particules fluviatiles du Brusquet.	150
Figure III-30 : Palynofacies observés dans les particules fluviatiles du Moulin.	151

Figure III-31 : Diagrammes de fréquence des mesures du R0 (%) des échantillons des profils 06-LA A (a), 06-LA S2 (b) et de l'échantillon T5 (c).	153
Figure III-32 : Diagrammes de fréquence des mesures du R0 (%) des échantillons de MES du bassin versant du Laval.	154
Figure III-33 : Diagrammes de fréquence des mesures du R0 (%) des échantillons du profil 06-BRU S1.	156
Figure III-33 : Diagrammes de fréquence des mesures du R0 (%) des échantillons des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat.	157
Figure III-34 : Diagramme de fréquence des mesures du R0 (%) de l'échantillon Brusquet MES 12/07/06.	158
Figure III-35 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax le long du profil A-LA V1.	159
Figure III-36 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax le long des profils 06-LA A (a) et LA A R (b).	160
Figure III-37 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax le long du profil 06-LA S2.	162
Figure III-38 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax dans les échantillons de particules fluviales du Laval.	163
Figure III-39 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax le long du profil 06-BRU S1.	166
Figure III-40 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax le long du profil 0BRU S1 Lat.	167
Figure III-41 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax le long du profil 06-BRU S3.	168
Figure III-42 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax le long du profil 0BRU S3 Lat.	169
Figure III-43 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax des échantillons des particules fluviales du Brusquet.	170
Figure III-44 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax des particules fluviales du Moulin.	172
Figure III-45 : a) graphique IH / TOC, b) graphique IH / IO et c) graphique IH / Tmax des échantillons OL, OF, OH et roches mères (échantillonnage 2006).	183
Figure III-46 : Exemple de particules amorphes du profil BRU S3 Lat contenant des particules réfléchissantes.	188

Chapitre IV

Figure IV-1- Pollen standard (Cupressus), en lumière transmise et sous excitation UV.	196
Figure IV-2 : mesure des densités des particules observées en palynofacies, échantillon 06 LA S2 OH.	199
Figure IV-3: mesure des densités des particules observées en palynofacies, échantillon 06 LA S2 PL 135 cm.	200
Figure IV-4: Geographical location of "Le Laval" watershed and samples localisation.	206
Figure IV-5: Categories of particulate organic matter distinguished by their morphological criteria.	210
Figure IV-6: Organic particles measurement. a) particles organic carbon in different density fractions (OH sample); b) particles organic carbon in different density fractions (PL sample), c) particles density.	212
Figure IV-7: Quantitative palynofacies counting. a) P1 and P1A profiles, b) P2 profile (PL, TF and samples).	214
Figure IV-8: Quantitative palynofacies counting. a) P3 profile, b) riverine particles (SL and BL samples), c) Rhone SL sample.	215
Figure IV-9: TOC (%), IH and Tmax evolutions along P1 and P1A profiles.	216
Figure IV-10: TOC (%), IH and Tmax evolutions along P2 PL profile (a), P2 TF profile, and (c) P3 profile.	217
Figure IV-11: TOC (%), IH and Tmax, riverine particles (SL, and BL samples).	218
Figure IV-12: Correlation between TOC obtained by rock Eval analysis and TOC calculated with quantitative palynofacies results.	222

Figure IV-13: Quantitative palynofacies results normalised against Al_2O_3 contents (noted AR) along profiles P1 and P1A (a), P2 (b) and P3 (c).	228
Figure IV-14: Pyrite concentrations normalised against Al_2O_3 contents (noted AR) along studied profiles.	229
Figure IV-15 : Rappel de la position des échantillons des profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat.	234
Figure IV-16 : Rappel de la position des échantillons des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat.	236
Figure IV-17 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 des particules de la MO et de la pyrite le long des profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat.	238
Figure IV-18 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite le long du profil 06-BRU S1, échantillons PL et sols.	240
Figure IV-19 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite le long du profil 06-BRU S1, échantillons PL et horizons A.	241
Figure IV-20 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite le long du profil BRU S1 Lat.	242
Figure IV-21 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite le long des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat.	243
Figure IV-22 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite le long du profil 06-BRU S3, échantillons PL.	244
Figure IV-23 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite le long du profil 06-BRU S3, comparaison entre les échantillons PL et TF.	245
Figure IV-24: % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite le long du profil BRU S3 Lat, échantillons PL et d'horizons A.	247
Figure IV-25 : Quantification des particules de MO et de pyrite dans les particules fluviatiles du Brusquet.	248
Figure IV-26 : % massiques normés aux % d' Al_2O_3 de la MO et de la pyrite au sein des particules fluviatile du Moulin.	249
Figure IV-27: Palynofacies classique et quantitatif du profil A-LAV1.	250
Figure IV-28 : Confrontation des COT calculés à partir des résultats du palynofacies quantitatif et de COT mesurés par pyrolyse Rock-Eval. Echantillons du Brusquet et du Moulin.	252
Figure IV-29: Décalage entre les profils 06-LA A et LA A R : a) représentation schématique du décalage ; b) décalage des CaO % entre les deux profils.	254
Figure IV-30 : Aspect des bactéries Bacta-pur TM XLG (lumière transmise).	265
Figure IV-31: Mesure de la DBO durant la dégradation bactérienne de concentrés organiques de roche brute.	268
Figure IV-32: Masses de particules récupérées en fin de traitement DBO (mg) pour 1 gramme d'échantillon initial (concentré organique de roche Callovo-Oxfordienne).	270
Figure IV-33: « groupe » de particules amorphes et de LCO apparaissant durant la dégradation bactérienne, a) en lumière transmise, b) en lumière réfléchie, c) en lumière réfléchie sur section polie.	270
Figure IV-34: Diagrammes de fréquence des mesures du R0 (%) des produits de la dégradation bactérienne de concentrés organiques de roche brute, et de l'échantillon initial (06-LA S2 135 cm).	271
Figure IV-35 : Masses de particules récupérées en fin d'oxydation (mg) pour 1 gramme d'échantillon initial (concentré organique de roche Callovo-Oxfordienne).	273
Figure IV-36 : Diagrammes de fréquence des mesures du R0 (%) des produits de l'oxydation de concentrés organiques de roche brute, et de l'échantillon initial (06-LA S2 135 cm PL).	274
Figure IV-37: Masses de particules récupérées en fin d'hydrolyse (mg) pour 1 gramme d'échantillon initial (concentré organique de roche Callovo-Oxfordienne).	276
Figure IV-38 : Diagrammes de fréquence des mesures du Ro (%) des produits l'hydrolyse de concentrés organiques de roche brute, et de l'échantillon initial (06-LA S2 135 cm PL).	277
Figure IV-39: Mesure de la DBO durant la dégradation bactérienne de concentrés organiques de roche brute.	278

Figure IV-40 : dosage du COD dans les eaux issues de la dégradation bactérienne de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.	279
Figure IV-41 : Masses de particules récupérées en fin de traitement DBO (g) pour 1 gramme d'échantillon initial (échantillon OL du profil 06-LA S2).	281
Figure IV-42 : Particules de DGR observées au sein des produits de l'altération de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.	281
Figure IV-43: Photos de particules légèrement réfléchissantes (sections polies, lumière réfléchie) et mesures des R0 (%) au sein du produit d'altération (5 mois) de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.	282
Figure IV-44 : Masses de particules récupérées en fin d'oxydation (g) pour 1 gramme d'échantillon initial (échantillon OL du profil 06-LA S2).	284
Figure IV-45 : Particule d'AGO observée au sein des produits de dégradation de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.	285
Figure IV-46: Photos de particules légèrement réfléchissantes (sections polies, lumière réfléchie) et mesures des R0 (%) au sein du produit d'altération (5 mois) de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.	285
Figure IV-47 : Masses de particules récupérées en fin d'hydrolyse (g) pour 1 gramme d'échantillon initial (échantillon OL du profil 06-LA S2).	287
Figure IV-48 : Photos de particules légèrement réfléchissantes (sections polies, lumière réfléchie) et mesures des R0 (%) au sein du produit d'altération (5 mois) de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.	288
Figure IV-49 : Pertes estimées par palynofacies quantitatif durant l'altération bactérienne de concentrés organiques de roche brute.	291
Figure IV-50: Pertes estimées par palynofacies quantitatif durant l'oxydation de concentrés organiques de roche brute.	293
Figure IV-51: Pertes estimées par palynofacies quantitatif durant l'hydrolyse de concentrés organiques de roche brute.	295
Figure IV-52 : Masses de carbone initial (courbe noire), dissoutes (courbe bleue) et perdues (courbe noire pointillée), durant l'hydrolyse du concentré organique de roche brute.	296
Figure IV-53: Litière observée à proximité des profils 06-LA A et 06LA S2 (bassin du Laval). Ce cliché témoigne de l'hétérogénéité des composants (feuilles, débris de bois, aiguilles de pins ...) (cliché Y. Graz).	300
Figure IV-54 : Palynofacies, avant et après dégradation des échantillons constitués d'aiguilles de pins, de feuilles de chênes, d'herbacées et de petit bois.	300
Figure IV-55 : Evolution et amorphisation des membranes de feuille.	301
Figure IV-56 : Différentes particules d'AG observées selon le matériel d'origine.	302
Figure IV-57 : Comparaison de particules réfléchissantes appartenant à la MOR (DGR) et à la MOF (DG ou LCO).	304
Figure IV-58 : Classement des particules selon leur labilité à partir des pertes maximales observées sur le terrain et par expérimentation.	309
Figure IV-60 : Comparaison des pertes maximales observées sur le terrain lors des transferts Altérites / Terres fines (a) et Altérites / Sols (b) avec les pertes maximales obtenues par expérimentation.	310
Figure IV-61: Diagrammes triangulaires représentant les contributions de chaque constituant de la MOF au sein des pertes massiques cumulées (LCO, MOAr et DG).	311
Figure IV-62 : Synthèse de la confrontation de données obtenues sur le terrain, et par expérimentations.	313

Chapitre V

Figure V-1: Chroniques d'exports solides rapportées aux surfaces totales des bassins versant de Draix (données corrigées à partir des données de Klotz, 2005).	320
Figure V-2 : Relation entre l'IH et le % de MOR pour les échantillons des bassins versant de Draix.	322

Figure V-3 : COTr et COTf calculés pour l'ensemble des particules fluviales des bassins versants de Draix et âges C ¹⁴ mesurés.	324
Figure V-4 : Variabilités saisonnières et annuelles des paramètres Rock-Eval des particules fluviales des bassins versants du Laval (a), du Brusquet (b) et du Moulin (c).	326
Figure V-5: Chroniques des FmCOF (t/ha/an) des bassins versants expérimentaux de Draix.	327
Figure V-6 : Chroniques des FcCOF (t/ha/an) des bassins versants du Laval, du Moulin et de la Roubine.	331
Figure V-7: Les précipitations annuelles moyennes des bassins versants de Draix.	334
Figure V-8 : Effets des facteurs pente et taux de terrain non végétalisé sur les FmCOF (a) et sur les FcCOF (b).	336
Figure V-9 : Corrélations entre les rapports FmCOF / FcCOF moyens et les facteurs taux de terrain non végétalisé et pente.	336
Figure V-10: Corrélations entre FmCOF annuels et les précipitations annuelles pour les bassins versants de Draix.	337
Figure V-11: Corrélations entre FcCOF annuels et les précipitations annuelles pour les bassins versants de Draix.	337
Figure V-12: Corrélations entre les FmCOF issus des mesures d'exports solides et les FmCOF issus de la modélisation MmL.	342
Figure V-13: Barrage végétal et rétention de matériel érodé en amont observé dans le bassin du Brusquet (cliché, Y. Graz).	343
Figure V-14: FmCOF obtenus par la modélisation MmNV1 : a) corrélation entre les FmCOF issus des mesures d'exports solides et les FmCOF issus de la modélisation MmNV ; b) FmCOFn modélisés ; c) FmCOFv modélisés.	346
Figure V-15: FmCOF obtenus par la modélisation MmNV2 : a) corrélation entre les FmCOF issus des mesures d'exports solides et les FmCOF issus de la modélisation MmNV2 ; b) FmCOFn modélisés ; c) FmCOFv modélisés.	347
Figure V-16: Corrélations entre les FmCOF issus des mesures d'exports solides et les FmCOF issus des modélisations MmTnPt, MmTnPre et MmPtPre.	350
Figure V-17: Corrélations entre les FmCOF issus des mesures d'exports solides et les FmCOF issus des modélisations simples MmTn, MmPt et MmPre.	353
Figure V-18 : Localisation des sites retenus (sites du Savournon et du Saignon).	354
Figure V-19: FmCOF des sous bassins versants du Saignon estimés à partir des flux de matériel solide et FmCOF modélisés selon MmTnPre et MmTn.	357
Figure V-20 : Relations entre production sédimentaire et couverture végétale des bassins versants du Saignon pour l'année 1997(Rey, 2002a).	357
Figure V-21: FmCOF des bassins de Savournon estimés à partir des flux solides et FmCOF modélisés selon MmTnPre et MmTn.	358
Figure V-22: Corrélations entre les FcCOF issus des flux de matériel dissous et les FcCOF issus de la modélisation McL.	361
Figure V-23: Corrélations entre les FcCOF issus des flux de matériel dissous et les FcCOF issus de la modélisation McL2.	362
Figure V-24 : FcCOF obtenus par la modélisation McNV1 : a) corrélation entre les FcCOF estimés à partir des flux de matériels dissous et les FcCOF issus de la modélisation McNV1 ; b) FcCOFv modélisés et c) FcCOFn modélisés.	365
Figure V-25: FmCOF obtenus par la modélisation MmNV2 ; a) corrélation entre les FcCOF estimés à partir des flux de matériel dissous et les FcCOF issus de la modélisation McNV1 ; b) FcCOFv modélisés et c) FcCOFn modélisés.	366
Figure V-26: Corrélations entre les FcCOF estimés à partir des flux de matériel dissous et les FcCOF issus des modélisations McTnPt, McTnPre et McPtPre.	369

Figure V-27: Corrélations entre les FcCOF estimés à partir des flux de matériel dissous et les FcCOF issus des modélisations McTn, McPt et McPre.	371
Figure V-28 : Estimations des FcCOF du Brusquet à partir des modélisations McL, McL2, McNV1 et McNV2.	372
Figure V-29: Corrélations entre les FcCOF moyens et les facteurs taux de terrain non végétalisé (a) et pente (b)(avec prise en compte des valeurs modélisées du Brusquet).	374
Figure V-30 : Corrélations entre les rapports FmCOF / FcCOF moyens et les facteurs taux de terrain non végétalisé (a) et pente (b). (avec prise en compte des valeurs modélisées du Brusquet).	374
Figure V-31: FcCOF modélisés des sous bassins du Saignon (modèles McTnPre et McTn).	375
Figure V-32: FcCOF modélisés des bassins de Savournon (modèles McTnPre et McTn).	376
Figure V-33: Dépôt de matériaux issus de l'érosion des badlands après inondation à Angle (ravin du petit Riou, mai 1889, Archives ONF / RTM, Léonard, 2004).	379
Figure V-34: Evolution du taux de boisement des bassins versant du Brusquet et du Laval ; a) photo du Brusquet en 1877 et en 1995 (Chauvin, 2002) ; b) évolution du taux de boisement du Laval et du Brusquet depuis deux siècles (Vallauri, 1997).	379
Figure V-35 : Cartes de végétations des bassins du Laval et du Brusquet en 1830, 1948 et en 1995 (d'après Vallauri, 1997 a et b).	380
Figure V-36 : Estimation des précipitations annuelles moyennes pour le site de Draix (1800-1987) :a) comparaison des précipitations mesurées à Draix et à Marignane (1984-2002) ; b) estimation des précipitations annuelles moyennes pour le site de Draix à partir des précipitations mesurées à Marseille (1800-1987).	381
Figure V-37 : Evolution des FmCOF des bassins du Laval et du Brusquet au cours des deux derniers siècles selon les modèles MmL, MmNV1 et MmNV2.	383
Figure V-38 : Tonnages de COF libéré par l'altération mécanique des roches et exporté par les rivières depuis 1800 (bassins du Laval et du Brusquet).	384
Figure V-39 : Evolution des FcCOF des bassins du Laval et du Brusquet au cours des deux derniers siècles selon les modèles McL2, McNV1 et McNV2.	386
Figure V-40: Tonnages de COF libéré par l'altération chimique des roches depuis 1800 (bassins du Laval et du Brusquet).	387
Figure V-41: Evolution du rapport FmCOF / FcCOF de 1800 à nos jours.	388
Figure V-42: Quantification des exports de COF retenus en relation avec la reforestation (1970 -1890), bassin du Brusquet.	389
Figure V-43: Quantification du COF libéré par l'altération chimique des roches en relation avec la reforestation (1970 -1890), bassin du Brusquet.	389
Figure V-44: Carte des terrains marneux érodés du bassin versant de la Durance (Rey et al, 2007).	391
Figure V-45: Palynofacies quantitatif de l'échantillon de MES du Rhône prélevé à Arles en Juin 2008.	393
Figure V-46: Quelques exemples de particules organiques observées dans l'échantillon de MES du Rhône prélevé à Arles en Juin 2008.	394
Figure V-47: Comparaison des observations effectuées sur l'échantillon de MES du Rhône) et sur ceux de Draix .	395
Figure V-48: Exemples de colonnes stratigraphiques du Sud –Est de la France (source geol-alp.com).	396

Chapitre VI

Figure VI-1: Effets du taux de végétalisation et de la pente sur la part de COF « perdu » par rapport au COF libéré par les altérations mécaniques et (bios) chimiques.	408
Figure VI-2: Flux et stockages actuels de COF au sein des bassins du Brusquet (a) et du Laval (b).	409
Figure VI-3 : Epaisseurs moyennes des humus et horizons A observés.	412

Figure VI-4: Comparaisons des flux, stocks et exports de COR (Carbone Organique Récent) et COF (Carbone Organique Fossile) au sein des bassins versants du Brusquet (a et b) et du Laval (c et d) durant les deux derniers siècles. 415

Figure VI-5: Evolution de la masse des différentes matières organiques présentes le long d'une carotte sédimentaire du lac Bramant (massif des Grandes Rousses, France). 417

Figure VI-6 : « Vieillissement » des âges radiocarbone en fonction de la proportion en MOF. 419

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I-1 : compilation des différentes études optiques indiquant la contribution fossile dans divers sédiments récents (Tyson, 1995).	28
Tableau I-2 : récapitulatif des approches des différentes études présentées.	43

Chapitre II

Tableau II-1 : Principales caractéristiques des bassins versants (Cemagref).	56
Tableau II-2 : Dispositifs de mesures et dates d'installation (Mathys, 2006).	62
Tableau II-3 : Echantillonnage des particules fluviales, bassin versant de Laval.	71
Tableau II-4 : Echantillonnage des particules fluviales, bassin versant du Brusquet.	77
Tableau II-5 : Echantillonnage des particules fluviales, bassin versant du Moulin.	78
Tableau II-6 : Récapitulatif des avantages et inconvénients des méthodes utilisées.	89

Chapitre III

Table III-1: Bedrocks, soils profiles and riverine particles samples values. Noticed that Rock-Eval parameters and S2 signal deconvolution have already been published by Copard et al (2006).	117
Table III-2: Weathering profiles samples values. Noticed that A-LAV1 Rock-Eval parameters and S2 signal deconvolution have already been published by Copard et al (2006).	118
Tableau III-3 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax des échantillons LAR2, LAR3, LAR4 et LAR5.	164
Tableau III-4 : Evolution des paramètres COT, IH et Tmax des échantillons B1, B2, B3, B4, B5 et B6.	171
Tableau III-5 : Teneurs en éléments majeurs et pertes au feu des échantillons du profil A-LA V1.	173
Tableau III-6 : Teneurs en éléments majeurs et pertes au feu des échantillons des profils 06-LA A et LA A R.	174
Tableau III-7: Teneurs en éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons du profil 06-LA S2.	175
Tableau III-8 Teneurs en éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons de MES du Laval.	175
Tableau III-9 : Teneurs en éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons des profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat.	176
Tableau III-10 : Teneurs en éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat .	177
Tableau III-11 : Teneurs en éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons de MES du Brusquet.	178
Tableau III-12 : Teneurs en éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons de MES du Moulin.	178
Tableau III-13 : % de MOF au sein de la MO des différents compartiments étudiés (Palynofacies, % des surfaces comptées).	191

Chapitre IV

Tableau IV-1 : densités moyennes attribuées aux particules observées.	201
Tableau IV-2: Samples mineral contents.	220
Tableau IV-3: Samples mineral contents normalised against Al_2O_3 contents (noted AR).	225
Tableau IV-4 : PNA des éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons des profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat. PNA : teneurs en éléments normées à la teneur en Al_2O_3 .	235
Tableau IV-5 : PNA des éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat. PNA : teneurs en éléments normées à la teneur en Al_2O_3 .	237
Tableau IV-6 : PNA des éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons de particules fluviatiles du Brusquet. PNA : teneurs en éléments normées à la teneur en Al_2O_3 .	240
Tableau IV-7 : PNA des éléments majeurs, et pertes au feu, des échantillons de particules fluviatiles du Moulin. PNA : teneurs en éléments normées à la teneur en Al_2O_3 .	249
Tableau IV-8: Définition des compartiments étudiés.	256
Tableau IV-9 : récapitulatif des pertes observées durant les transitions entre compartiments sur le terrain, les - traduisent l'intensité des pertes et les + celle des apparitions.	261
Tableau IV-10 : Paramètres Rock-Eval des bactéries Bacta-pur TM XLG.	265
Tableau IV-11: Pesées et paramètres Rock-Eval des produits de la dégradation bactérienne de concentrés organiques de roche brute.	266
Tableau IV-12: Masses de particules récupérées en fin de traitement DBO (mg) pour 1 gramme d'échantillon initial (concentré organique de roche Callovo-Oxfordienne).	269
Tableau IV-13: Pesées et paramètres Rock-Eval des produits de l'oxydation de concentrés organiques de roche brute.	272
Tableau IV-14 : Masses de particules récupérées en fin d'oxydation (mg). pour 1 gramme d'échantillon initial (concentré organique de roche Callovo-Oxfordienne).	273
Tableau IV-15: Pesées et paramètres Rock-Eval des produits de l'hydrolyse de concentrés organiques de roche brute.	275
Tableau IV-16 : Masses de particules récupérées en fin d'hydrolyse (mg) pour 1 gramme d'échantillon initial (concentré organique de roche Callovo-Oxfordienne).	276
Tableau IV-17 : Pesées des produits de la dégradation bactérienne de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.	278
Tableau IV-18 : Masses de particules récupérées en fin de traitement DBO (g) pour 1 gramme d'échantillon initial (échantillon OL du profil 06-LA S2).	281
Tableau IV-19 : Pesées (grammes) des produits de l'oxydation de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.	283
Tableau IV-20 : Masses de particules récupérées en fin d'oxydation (g) pour 1 gramme d'échantillon initial (échantillon OL du profil 06-LA S2).	284
Tableau IV-21 : Pesées (grammes) des produits de l'hydrolyse de l'échantillon OL du profil 06-LA S2.	286
Tableau IV-22 : Masses de particules récupérées en fin d'hydrolyse (g) pour 1 gramme d'échantillon initial (échantillon OL du profil 06-LA S2).	287
Tableau IV-23 : Pertes estimées par palynofacies quantitatif durant l'altération bactérienne de concentrés organiques de roche brute.	290
Tableau IV-24 : Pertes estimées par palynofacies quantitatif durant l'oxydation de concentrés organiques de roche brute.	292
Tableau IV-25: Perte estimées par palynofacies quantitatif durant l'hydrolyse de concentrés organiques de roche brute.	294
Tableau IV-26 : Bilan de l'altération de la MOR, les - traduisent l'intensité des pertes et les + celle des apparitions.	304

Tableau IV-27 : Bilan de l'altération expérimentale de la MOF, les - traduisent l'intensité des pertes et les + celle des apparitions.	306
Tableau IV-28 : Contributions massiques moyennes de MOF(en mg MOF/g d'échantillon) ans les compartiments Roches, Altérites, Terres fines et Sols des bassins de Draix.	314
Tableau IV-29 : Contributions massiques moyennes de MOF(en mg MOF/g d'échantillon) ans les particules fluviales des bassins de Draix.	314

Chapitre V

Tableau V-1 : COTr et COTf calculés pour l'ensemble des particules fluviales des bassins versants de Draix.	323
Tableau V-2 : Moyennes (μ) et écart-types (σ) du matériel dissous des eaux des bassins de la Roubine, du Moulin, du Laval, et de pluies (Cras, 2005).	328
Tableau V-3 : Masses dissoutes exportées par bassin sur la période 1984 - 2002 avec les limites inférieures et supérieures de l'intervalle de confiance à 70% (Cras, 2005).	329
Tableau V-4 : Taux de végétalisation et pentes moyennes des bassins étudiés.	333
Tableau V-5 : FmCOF moyens, FcCOF moyens et rapports FmCOF / FcCOF des bassins versants étudiés.	336
Tableau V-6: Données initiales pour la modélisation des FmCOF.	341
Tableau V-7 : Remplissage des retenues de barrages RTM et production spécifique de sédiments par bassin versant (rapportée à la surface totale du bassin) H = amont et B = aval des bassins versants (Rey et al, 2002).	355
Tableau V-8 : Exports solides, taux de terrain végétalisé, pentes et précipitations annuelles des bassins versants de Savournon, année 1985 à 1985 (d'après Olivry et Hoorelbeck, 1990).	355
Tableau V-9 : FmCOF des sous bassins du Saignon estimés à partir des flux solides et FmCOF modélisés selon MmTnPre et MmTn.	356
Tableau V-10 : FmCOF des bassins de Savournon estimés à partir des flux solides et FmCOF modélisés selon MmTnPre et MmTn.	358
Tableau V-11: Données initiales pour la modélisation des FcCOF.	360
Tableau V-12 : FmCOF moyen, FcCOF moyen et rapport FmCOF / FcCOF des bassins versants étudiés.	373
Tableau V-13 : FcCOF des sous bassins du Saignon modélisés selon McTnPre et McTn.	375
Tableau V-14 : FcCOF des bassins de Savournon modélisés selon McTnPre et McTn.	376
Tableau V-15 : Evolution du taux de boisement depuis deux siècles dans les Alpes-de-Haute-Provence, les Hautes-Alpes et la Drôme (sources : 1. d'après les cartes de Cassini ; 2. d'après les cadastres, dans Demontzey, 1878 ; 3. d'après I.F.N. 1989) (Vallauri, 1997).	378
Tableau V-16: Ablation sur les principaux terrains tendres des Préalpes du sud (Descroix, 1998):- Site : Bar. = Baronnies, PdB = pays du Buëch ;- durée : durée de la période d'observations ;- procédés : règle = règle topographique ; piège = piège à sédiments.	397

Chapitre VI

Tableau VI-1: Contributions moyennes en MOF dans les compartiments Roches, Altérites, Terres fines et Sols des bassins de Draix. Ces contributions sont exprimées en masse (mg/g d'échantillon) et en % de la MO totale.	405
Tableau VI-2 : Contributions moyennes en MOF dans les particules fluviales des bassins du Laval , du Brusquet et du Moulin. Ces contributions sont exprimées en masse (mg/g d'échantillon) et en % de la MO totale .	405

Tableau VI-3: Récapitulation des différents flux de COF au sein des bassins versants de Draix. FmCOF : flux de COF libéré par l'altération mécanique des roches ; FcCOF : flux de COF libéré par les altérations (bio)chimiques des roches ; Le flux libéré total correspond à la somme des FmCOF et des FcCOF. 407

Tableau VI-4: Estimation des productions, stocks et exports de COR et COF au sein des bassins versants du Laval et du Brusquet depuis 1800. 413

Annexes

Annexe 1 : méthode de palynofacies.

Les échantillons (1g environ), préalablement séchés et broyés, sont soumis à une succession d'attaques acides afin de supprimer la phase minérale. Ces dernières s'enchainent de la façon suivante :

Attaque d'acide chlorhydrique :

- placer l'échantillon dans un bêcher en téflon de 250 ml ;
- ajouter petit à petit 50 ml d'acide chlorhydrique (HCL, 36 %) et attendre 30 minutes afin de dissoudre les carbonates ;
- ajouter de l'eau distillée et laisser décanter une demi-heure ;
- éliminer le surnageant.

Attaque d'acide fluorhydrique :

- ajouter petit à petit 50 ml d'acide fluorhydrique (HF, 50 %) ;
- placer le bêcher dans un bain de sable pendant 12 heures, dont 2 chauffées à 50°C, afin de dissoudre les silicates ;
- ajouter de l'eau distillée et laisser décanter une demi-heure ;
- éliminer le surnageant.

Attaque d'acide chlorhydrique :

- ajouter petit à petit 50 ml d'acide chlorhydrique (HCL, 36 %) et attendre 30 minutes afin de dissoudre chlorures et fluorures potentiellement formés durant les étapes précédentes ;
- ajouter de l'eau distillée et laisser décanter une demi-heure ;
- éliminer le surnageant.

Rinçage :

- transvaser la solution obtenue dans des pots à centrifuger en plastique de 100 ml ;
- ajouter de l'eau distillée ;
- centrifuger 3 min à 1500trs/min ;
- répéter l'opération jusqu'à obtenir un PH proche de la neutralité.

Montage des lames pour l'observation microscopique :

- éliminer le plus d'eau possible des tubes de stockages à l'aide de pipettes pasteur ;
- passer le tube quelques secondes sur un agitateur vibreur et prélever 20 à 30 µl de concentré organique et les monter entre lame et lamelle. ;

Annexe 2 : Principaux paramètres acquis et calculés durant la pyrolyse Rock-Eval**a)**

Acquisition parameters	Detector/Oven	Unit	Name
<i>S1</i>	FID/Pyrolysis	mg HC/g rock	Free hydrocarbons
<i>S2</i>	FID/Pyrolysis	mg HC/g rock	Oil potential
<i>TpS2</i>	–	°C	Temperature of peak <i>S2</i> maximum
<i>S3</i>	IR/Pyrolysis	mg CO ₂ /g rock	CO ₂ organic source
<i>S3'</i>	IR/Pyrolysis	mg CO ₂ /g rock	CO ₂ mineral source
<i>TpS3'</i>	–	°C	Temperature of peak <i>S3'</i> maximum
<i>S3CO</i>	IR/Pyrolysis	mg CO/g rock	CO ₂ organic source
<i>TpS3CO</i>	–	°C	Temperature of peak <i>S3CO</i> maximum
<i>S3'CO</i>	IR/Pyrolysis	mg CO/g rock	CO organic and mineral source
<i>S4CO₂</i>	IR/Oxidation	mg CO ₂ /g rock	CO ₂ organic source
<i>S5</i>	IR/Oxidation	mg CO ₂ /g rock	CO ₂ mineral source
<i>TpS5</i>	–	°C	Temperature of peak <i>S5</i> maximum
<i>S4CO</i>	IR/Oxidation	mg CO/g rock	CO organic source

b)

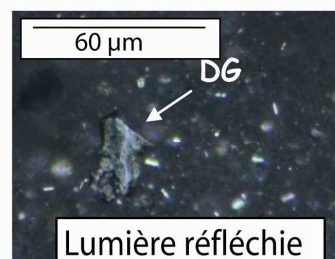
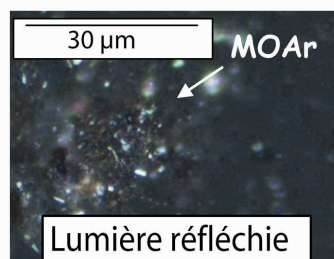
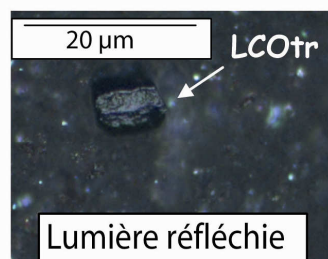
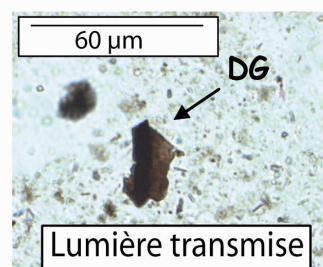
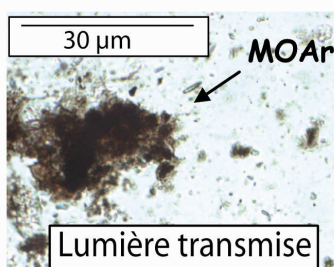
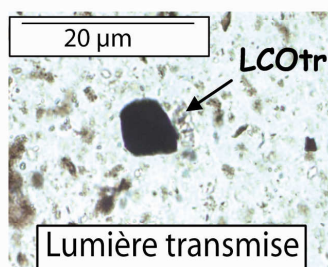
Calculated parameters	Unit	Formula	Name
<i>Tmax</i>	°C	$TpS2 - \Delta Tmax^*$	<i>Tmax</i>
PI		$\frac{S1}{(S1 + S2)}$	Production index
PC	wt%	$\frac{[(S1 + S2) \times 0,83] + \left[S3 \times \frac{12}{44} \right] + \left[\left(S3CO + \frac{S3'CO}{2} \right) \times \frac{12}{28} \right]}{10}$	Pyrolysable org. carbon
RC CO	wt%	$\frac{S4CO \times \frac{12}{28}}{10}$	Residual org. carbon (CO)
RC CO ₂	wt%	$\frac{S4CO_2 \times \frac{12}{44}}{10}$	Residual org. carbon (CO ₂)
RC	wt%	RC CO + RC CO ₂	Residual org. carbon
TOC	wt%	PC + RC	Total organic carbon
<i>S1</i> /TOC	mg HC/g TOC	$\frac{S1 \times 100}{TOC}$	
HI	mg HC/g TOC	$\frac{S2 \times 100}{TOC}$	Hydrogen index
OI	mg CO ₂ /g TOC	$\frac{S3 \times 100}{TOC}$	Oxygen index
OI CO	mg CO/g TOC	$\frac{S3CO \times 100}{TOC}$	Oxygen index CO
PyroMinC	wt%	$\frac{\left[S3' \times \frac{12}{44} \right] + \left[\left(\frac{S3'CO}{2} \right) \times \frac{12}{28} \right]}{10}$	Pyrolysis mineral carbon
OxiMinC	wt%	$\frac{S5 \times \frac{12}{44}}{10}$	Oxidation mineral carbon
MinC	wt%	PyroMinC + OxiMinC	Mineral carbon

Annexe 2 : Paramètres délivrés par la pyrolyse Rock-Eval (Behar et al, 2001).

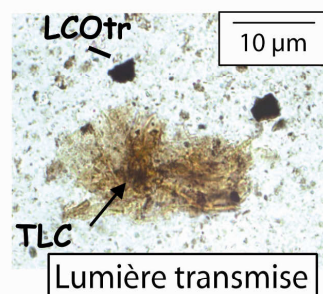
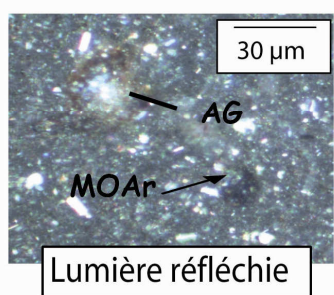
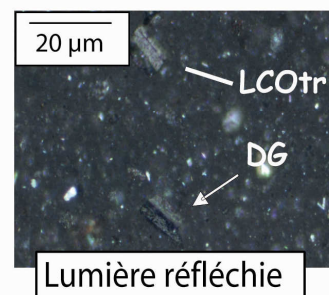
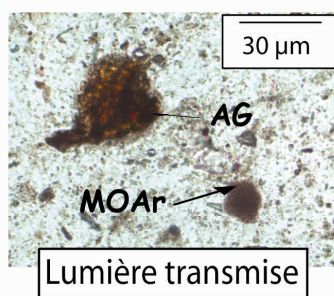
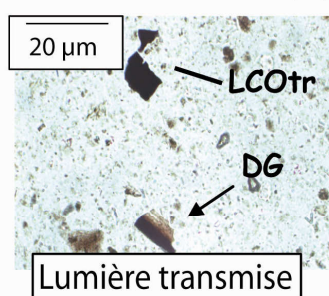
- a) paramètres acquis durant la pyrolyse ;
b) paramètres calculés à partir des précédents.

Bassin versant du Laval, échantillons PL et TF

Echantillons de plaquettes de marnes (PL)



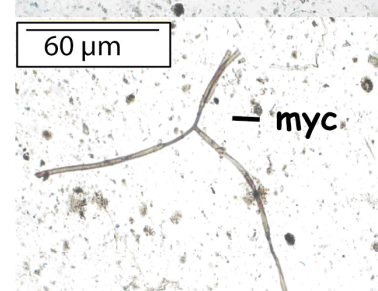
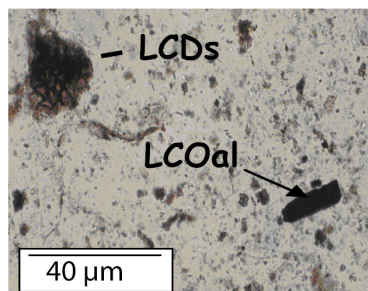
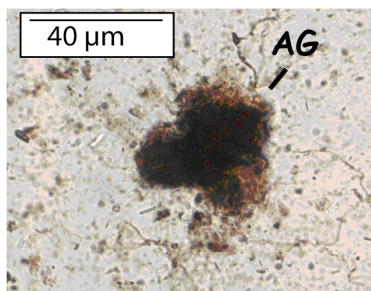
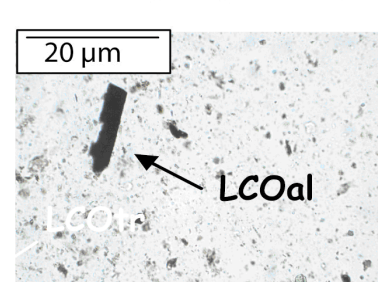
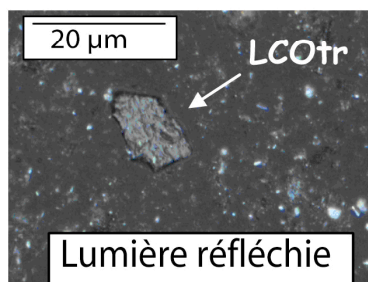
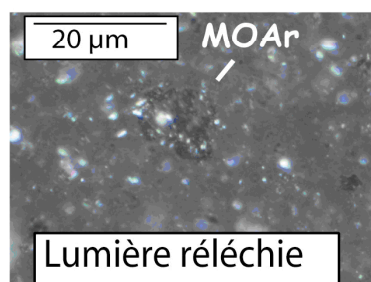
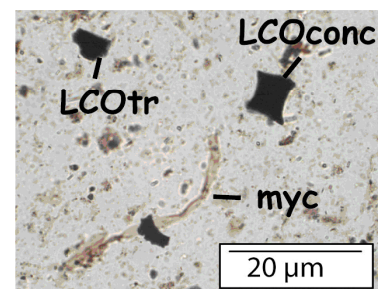
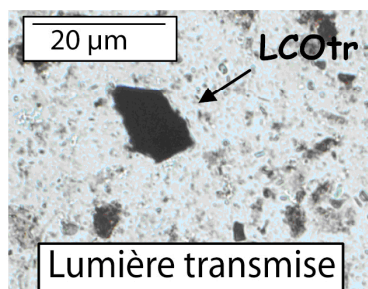
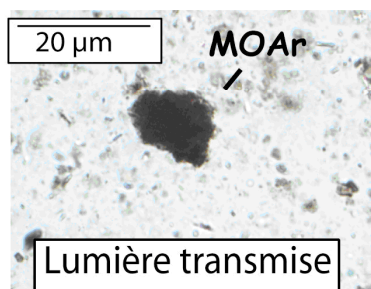
Echantillons de terres fines (TF)



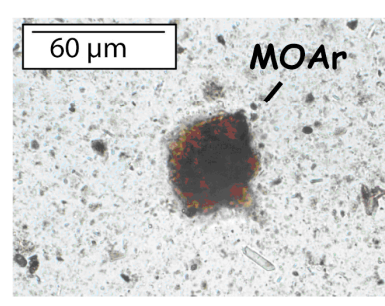
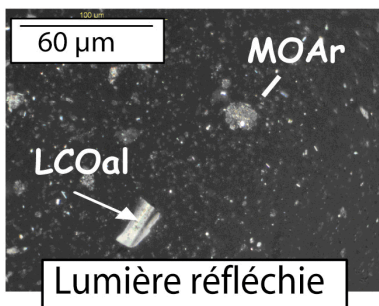
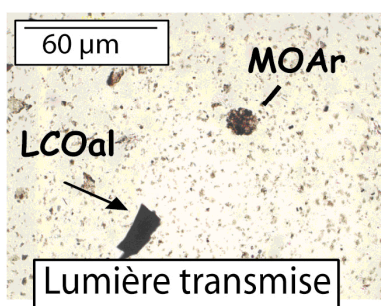
Annexe 3 : Particules organiques observées au sein des échantillons PL et TF des profils 06-LA A, LA A R et 06-LA S2 (bassin versant du Laval).

Bassin versant du Laval

Horizon A



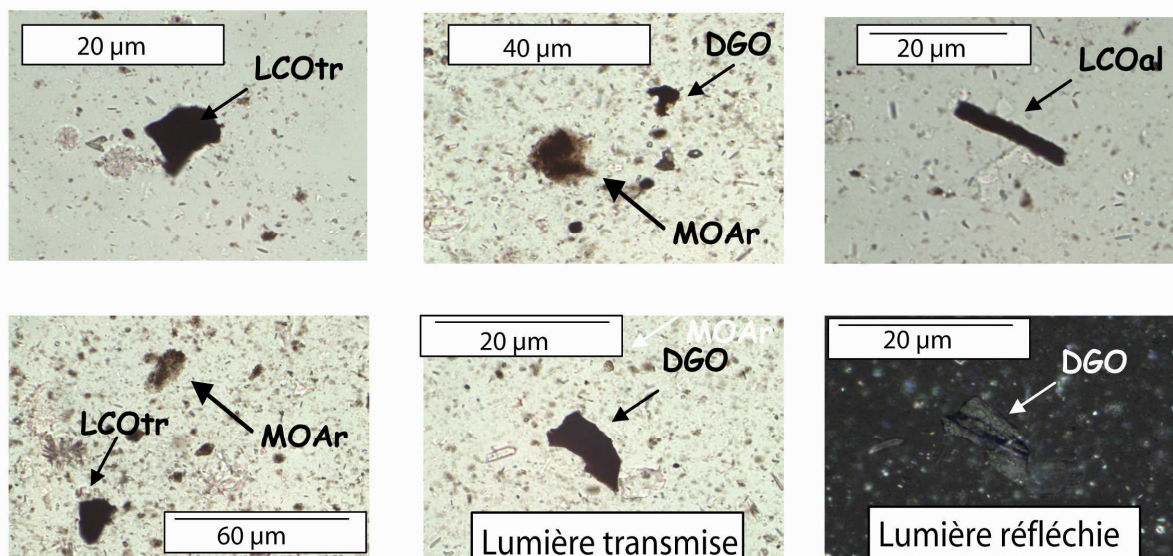
Particules fluviatiles (MES et CF)



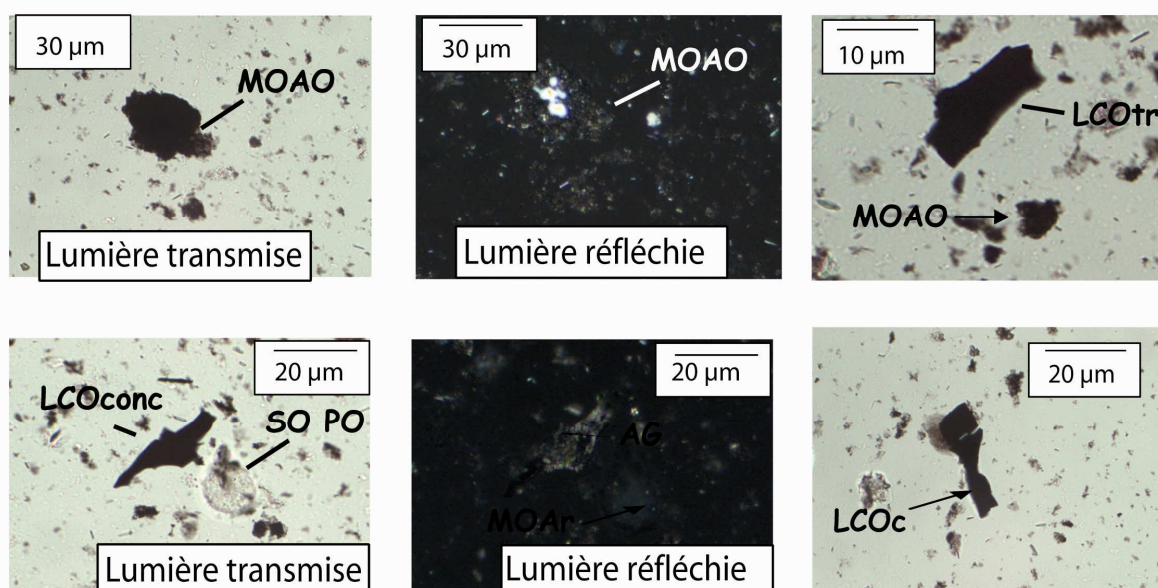
Annexe 4 : Particules organiques observées au sein de l'échantillon d'horizon A du profil 06-LA S2 et au sein des particules fluviatiles du bassin du Laval.

Bassin versant du Brusquet, profil 06-BRU-S1, échantillons PL

06-BRU-S1, échantillons de plaquettes(PL) de 20 à 45 cm de profondeur



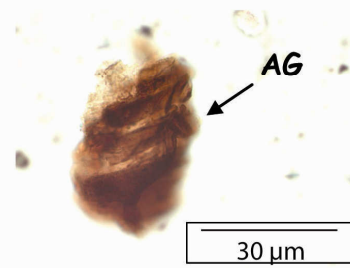
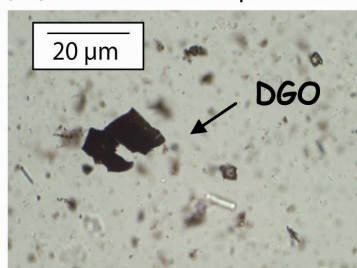
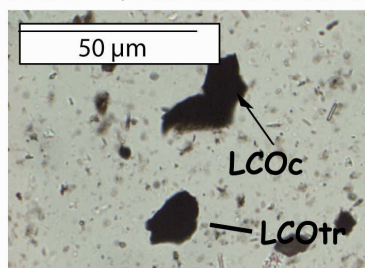
06-BRU-S1, échantillons de plaquettes(PL) de 45 cm de profondeur au fond du profil



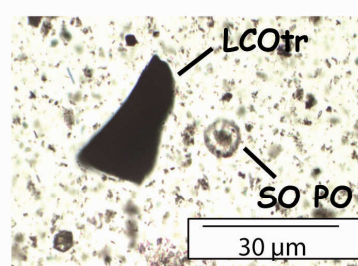
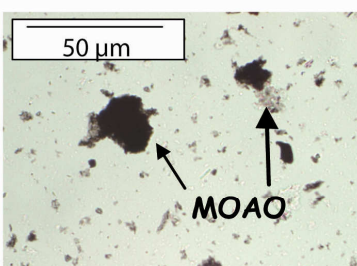
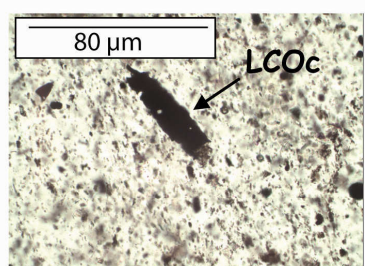
Annexe 5 : Particules organiques observées au sein des échantillons PL du profil 06 BRU S1

Bassin versant du Brusquet, profil 06-BRU-S1, échantillons TF et horizons A

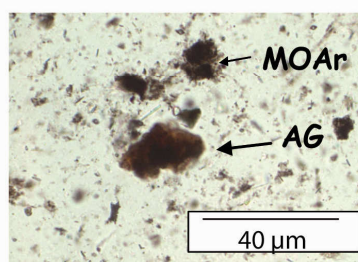
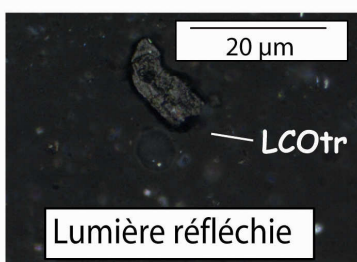
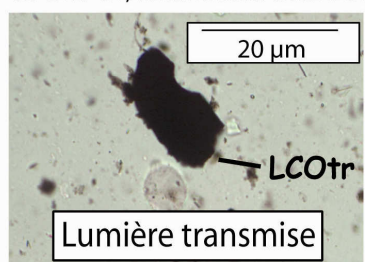
06-BRU-S1, échantillons de terres fines (TF) de 20 à 45 cm de profondeur



06-BRU-S1, échantillons de terres fines (TF) de 45 cm de profondeur au fond du profil



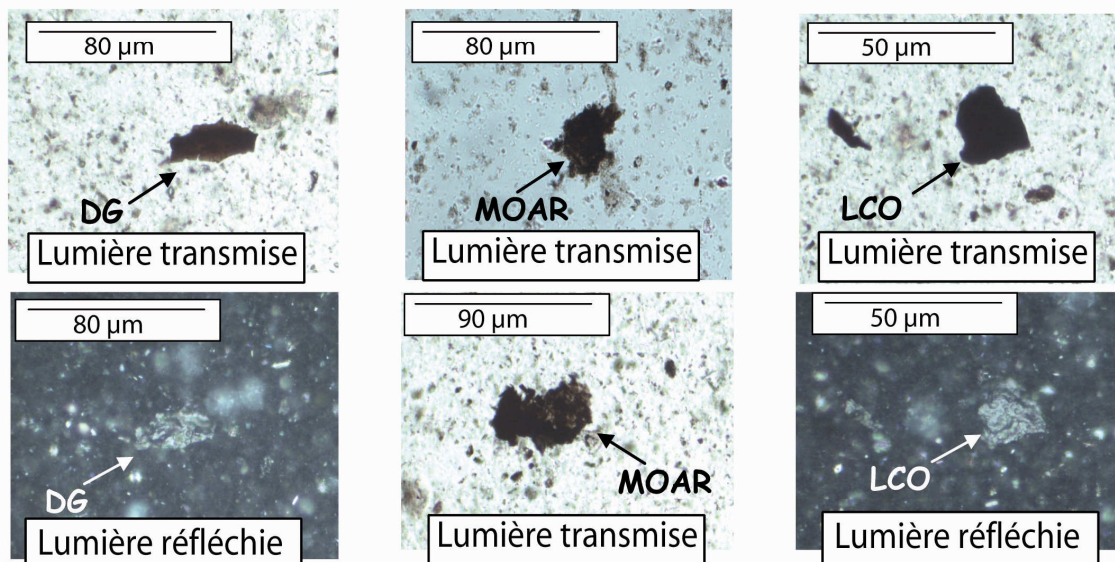
06-BRU-S1, échantillons d'horizon A



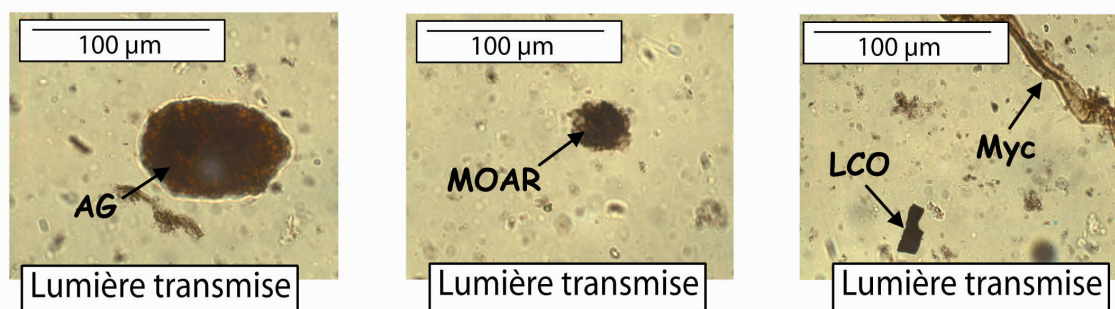
Annexe 6 : Particules organiques observées au sein des échantillons TF et d'horizons A du profil 06-BRU S1 (bassin versant du Brusquet).

Bassin versant du Brusquet, profils 06- BRU S3 et BRU S3 Lat

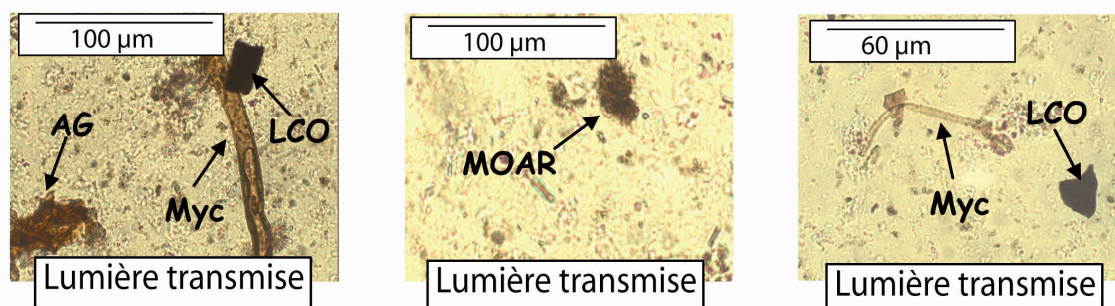
Echantillons de plaquettes de marnes (PL)



Echantillons de terres fines (TF)



Echantillons d'horizon A (BRU S3 Lat)



Annexe 7 : Particules organiques observées au sein des échantillons TH et d'horizon A des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat (bassin versant du Brusquet).

Annexes 8 à 16 : Résultats des palynofacies pour les échantillons étudiés

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOT	LCOc	LCOconco	LCO re	somme LCO
A-LAV1 6 cm	8.18	1.98	0.00	29.04	11.04	20.51	60.58	0.00	3.83	0.31	0.47	0.78	5.39
A-LAV1 12 cm	6.58	3.92	0.00	13.12	9.59	11.11	33.81	1.26	5.62	0.09	0.00	0.61	7.58
A-LAV1 18 cm	10.74	3.19	0.00	10.80	21.35	0.43	32.58	0.31	7.61	0.00	0.00	0.00	8.53
A-LAV1 24 cm	8.05	7.31	0.00	0.49	30.46	0.82	31.77	0.66	13.46	0.00	1.48	0.00	15.60
A-LAV1 30 cm	12.30	12.14	0.00	7.83	21.09	1.60	30.51	2.24	12.30	0.00	0.00	0.00	14.54
A-LAV1 36 cm	3.21	13.13	0.00	3.75	23.39	1.25	28.39	2.23	14.11	2.23	1.07	0.36	20.00
A-LAV1 42 cm	5.05	12.73	0.00	0.81	9.90	0.81	11.52	0.81	19.19	0.00	0.00	1.82	21.82
A-LAV1 48 cm	3.36	18.82	0.00	1.88	9.61	0.00	11.29	4.03	19.15	0.84	2.18	1.34	27.55
A-LAV1 54 cm	1.40	18.80	0.00	0.00	6.00	0.00	6.00	5.80	22.40	3.20	2.40	3.20	37.00
A-LAV1 60 cm	3.73	17.32	0.00	0.44	12.28	0.00	12.72	9.21	14.25	1.54	1.32	1.75	28.07
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
A-LAV1 6 cm	0.41	1.85	2.26	3.86	1.44	0.89	5.99	15.62	0.00	9.63	90.37		
A-LAV1 12 cm	0.65	10.81	11.46	2.88	3.49	1.00	7.36	29.28	0.00	22.96	77.04		
A-LAV1 18 cm	1.72	8.59	10.31	2.09	0.43	5.77	8.28	26.38	0.00	22.02	77.98		
A-LAV1 24 cm	2.38	13.14	15.52	1.84	0.00	0.25	1.89	19.87	0.00	38.42	61.58		
A-LAV1 30 cm	4.47	9.42	13.90	3.67	1.28	1.60	6.55	10.06	0.00	40.58	59.42		
A-LAV1 36 cm	1.61	13.13	14.73	2.14	0.00	3.39	5.54	15.00	0.00	47.86	52.14		
A-LAV1 42 cm	5.86	25.25	31.11	6.26	0.00	0.81	6.87	10.91	0.00	65.66	34.34		
A-LAV1 48 cm	3.36	18.31	21.67	5.04	0.00	2.18	7.22	9.24	0.84	68.04	31.12		
A-LAV1 54 cm	4.00	26.20	30.20	2.60	0.00	0.80	3.40	4.40	0.80	84.00	15.20		
A-LAV1 60 cm	0.88	17.11	17.98	2.41	0.00	0.00	2.41	17.76	0.00	63.38	36.62		

Annexe 8 : Résultats des palynofacies, profil AlAV1.
 % surfaciques des différentes particules observées (blanc) ;
 % surfaciques des sommes des particules LC, LCO, DG et éléments figurés
 et % de la MOF et MOR par rapport à la MO totale (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LGT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
06 LA A 0 cm	3,35	25,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,25	18,95	2,11	9,00	6,32	48,61
06 LA A 5 cm	0,00	24,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,90	19,10	7,46	5,97	2,99	48,42
06 LA A 10 cm	1,29	27,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,69	18,81	5,54	5,80	3,22	42,27
06 LA A 15 cm	2,82	26,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,36	19,17	3,27	3,42	4,75	39,97
06 LA A 20 cm	0,00	29,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,02	20,90	1,32	3,17	1,06	40,48
06 LA A 25 cm	0,00	26,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,62	22,08	3,47	6,15	1,58	42,90
06 LA A 30 cm	2,82	29,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,25	21,40	3,42	2,97	2,97	40,71
06 LA A 35 cm	0,00	27,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,19	20,49	5,77	4,00	1,77	41,22
06 LA A 40 cm	0,00	27,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,66	19,79	1,94	3,36	2,65	36,40
06 LA A 45 cm	0,00	24,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,59	19,78	3,00	5,18	3,14	39,70
06 LA A 50 cm	0,00	25,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,29	19,48	3,04	4,70	3,18	38,67
06 LA A 55 cm	0,00	31,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,53	15,98	2,15	2,69	3,23	31,59
06 LA A 60 cm	0,00	27,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,70	17,80	3,66	2,83	1,78	32,77
06 LA A 65 cm	0,00	26,15	0,00	0,00	0,00	0,16	0,16	9,50	16,33	4,91	5,87	3,31	39,91
06 LA A 70 cm	0,00	26,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,93	16,30	4,21	7,34	2,58	37,36
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LGT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
LA A R 0 cm	0,00	33,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,63	26,43	5,84	3,76	0,97	50,63
LA A R 10 cm	0,00	36,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,17	32,24	2,82	2,03	4,74	46,00
LA A R 20 cm	0,00	25,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,61	18,20	4,10	2,46	4,43	52,79
LA A R 25 cm	0,00	25,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,88	30,03	4,67	4,39	0,00	52,97
LA A R 30 cm	0,00	35,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,06	25,09	6,10	0,00	0,70	40,94
LA A R 35 cm	0,00	25,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,61	18,20	4,10	2,46	4,43	52,79
LA A R 40 cm	0,00	37,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,24	26,63	6,32	1,53	1,92	44,64
LA A R 45 cm	1,23	36,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,45	22,79	2,26	7,19	0,00	41,68
LA A R 50 cm	0,00	34,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,62	29,97	1,72	1,76	3,21	45,67
LA A R 55 cm	0,00	30,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,78	28,81	2,96	0,00	0,68	45,83
LA A R 60 cm	0,00	34,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,06	32,08	0,99	0,00	0,00	44,13
LA A R 65 cm	0,00	29,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,70	31,16	0,15	0,00	0,00	49,02
LA A R 70 cm	0,00	24,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,72	33,73	6,60	0,00	2,12	47,17
Echantillons	DG	DeO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOR %	MOR %		
06 LA A 0 cm	3,83	12,44	16,27	0,29	0,00	3,54	3,83	0,00	2,68	92,63	7,37		
06 LA A 5 cm	2,69	21,64	24,33	0,00	0,00	0,90	0,90	0,00	4,03	99,07	0,93		
06 LA A 10 cm	5,28	18,56	23,84	0,00	0,00	2,45	2,45	0,00	2,32	96,17	3,83		
06 LA A 15 cm	5,35	19,61	24,96	0,00	0,00	1,93	1,93	0,00	3,71	95,06	4,94		
06 LA A 20 cm	3,31	21,56	24,87	0,00	0,00	2,91	2,91	0,00	1,98	97,03	2,97		
06 LA A 25 cm	3,63	19,24	22,87	0,00	0,00	1,74	1,74	0,00	6,47	98,15	1,85		
06 LA A 30 cm	4,46	16,20	20,65	0,00	0,00	0,89	0,89	0,00	5,50	96,07	3,93		
06 LA A 35 cm	5,30	21,02	26,50	0,00	0,00	0,24	0,24	0,00	4,71	99,75	0,25		
06 LA A 40 cm	4,06	21,02	25,09	0,00	0,00	2,12	2,12	0,00	9,19	97,67	2,33		
06 LA A 45 cm	5,46	22,10	25,92	0,00	0,00	1,36	1,36	0,00	9,00	98,50	1,50		
06 LA A 50 cm	2,49	20,46	24,59	0,00	0,00	0,97	0,97	0,00	9,94	98,93	1,07		
06 LA A 55 cm	4,44	18,01	22,45	0,00	0,00	1,34	1,34	0,00	12,63	98,46	1,54		
06 LA A 60 cm	3,46	22,30	25,76	0,31	0,00	0,00	0,31	0,00	14,14	99,63	0,37		
06 LA A 65 cm	3,09	22,41	25,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,22	99,83	0,17		
06 LA A 70 cm	3,53	21,74	25,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,28	100,00	0,00		
Echantillons	DG	DeO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
LA A R 0 cm	1,25	14,60	15,86	0,00	0,42	0,00	0,42	0,00	0,00	99,58	0,42		
LA A R 10 cm	3,38	12,51	15,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,03	100,00	0,00		
LA A R 20 cm	1,64	19,84	21,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	100,00	0,00		
LA A R 25 cm	0,42	20,96	21,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,57	100,00	0,00		
LA A R 30 cm	1,05	17,77	18,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,88	100,00	0,00		
LA A R 35 cm	1,64	19,84	21,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	100,00	0,00		
LA A R 40 cm	0,96	14,18	15,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,07	100,00	0,00		
LA A R 45 cm	1,23	17,04	18,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,05	98,74	1,26		
LA A R 50 cm	0,96	18,11	19,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	100,00	0,00		
LA A R 55 cm	0,00	21,64	21,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,70	100,00	0,00		
LA A R 60 cm	0,00	16,20	16,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,95	100,00	0,00		
LA A R 65 cm	0,91	20,88	21,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00		
LA A R 70 cm	0,71	25,24	25,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,36	100,00	0,00		

Annexe 9 : Résultats des palynofacies, profils A-LA A et LA A R.
 % surfaciques des différentes particules observées (blanc) ;
 % surfaciques des sommes des particules LC, LCO, DG et éléments figurés
 et % de la MOF et MOR par rapport à la MO totale (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	somme LCO
06 LA S2 OL	20.29	0.00	0.00	4.79	20.92	26.64	52.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
06 LA S2 OH	6.80	0.50	0.00	9.20	22.50	15.20	46.90	0.20	0.00	0.00	0.10	0.00	0.30
06 LA S2 A	2.90	6.74	0.00	16.17	13.71	7.01	36.88	0.00	5.19	1.58	0.44	0.13	7.34
06 LA S2 20 cm PL	0.00	38.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.06	17.43	2.72	3.46	3.58	33.25
06 LA S2 25 cm PL	0.00	38.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.40	16.44	3.76	9.66	2.63	39.90
06 LA S2 30 cm PL	0.00	38.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.09	19.86	2.17	6.86	1.56	34.54
06 LA S2 35 cm PL	2.99	31.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.15	16.51	3.77	4.16	2.60	34.20
06 LA S2 40 cm PL	0.00	32.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.36	16.03	3.58	9.01	1.85	36.82
06 LA S2 45 cm PL	0.00	30.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.36	18.81	4.06	9.34	2.84	41.41
06 LA S2 50 cm PL	0.00	28.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.54	19.45	4.34	6.20	2.73	42.26
06 LA S2 55 cm PL	0.00	30.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.67	18.54	3.03	11.73	3.53	42.50
06 LA S2 60 cm PL	0.00	30.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.71	19.94	3.93	2.95	4.21	39.75
06 LA S2 65 cm PL	0.00	31.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.62	18.68	4.31	7.61	3.59	42.82
06 LA S2 70 cm PL	0.00	30.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.64	16.75	4.55	5.97	3.51	34.42
06 LA S2 75 cm PL	0.00	30.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.23	18.60	4.03	5.69	3.67	39.22
06 LA S2 80 cm PL	0.00	35.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.51	19.55	4.93	3.13	1.64	37.76
06 LA S2 85 cm PL	0.00	35.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.19	18.30	0.98	8.94	3.49	35.69
06 LA S2 90 cm PL	0.00	29.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.44	22.44	3.13	8.09	2.70	43.80
06 LA S2 95 cm PL	0.00	25.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.19	19.86	1.14	5.82	1.14	39.16
06 La S2 100 cm PL	0.00	28.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.81	19.32	1.56	7.53	1.99	39.20
06 La S2 110 cm PL	0.00	26.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.71	23.03	0.60	5.37	0.00	37.71
06 La S2 115 cm PL	0.00	30.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.96	19.55	4.85	11.08	3.46	44.70
06 La S2 120 cm PL	0.00	35.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.33	23.20	1.46	4.60	2.82	37.41
06 La S2 125 cm PL	0.00	25.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.90	19.15	0.46	3.65	3.04	34.19
06 La S2 135 cm PL	0.00	31.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.30	19.09	0.99	4.31	4.68	34.36
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
06 LA S2 OL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.11	18.11	9.26	0.00	0.00	100.00		
06 LA S2 OH	0.50	0.20	0.70	5.30	1.20	3.00	9.50	35.00	0.30	1.50	98.50		
06 LA S2 A	0.37	4.28	4.65	4.18	0.00	1.01	5.19	36.07	0.00	18.77	81.23		
06 LA S2 20 cm PL	2.97	21.51	24.47	0.00	0.49	2.97	3.46	0.00	0.74	96.51	3.49		
06 LA S2 25 cm PL	5.40	16.19	21.58	0.00	0.38	2.51	2.89	0.00	1.00	97.06	2.92		
06 LA S2 30 cm PL	4.45	20.12	24.57	0.00	0.00	2.08	2.08	0.00	0.60	97.91	2.09		
06 LA S2 35 cm PL	4.55	18.86	23.41	0.00	0.00	4.16	4.16	0.00	3.25	92.61	7.39		
06 LA S2 40 cm PL	4.11	19.07	23.18	0.00	0.00	3.71	3.71	0.00	3.84	96.14	3.86		
06 LA S2 45 cm PL	5.14	18.54	23.68	0.00	0.00	2.71	2.71	0.00	1.76	97.25	2.75		
06 LA S2 50 cm PL	2.97	17.35	20.32	0.00	0.00	3.22	3.22	0.00	5.58	96.59	3.41		
06 LA S2 55 cm PL	3.79	17.91	20.43	0.00	0.00	4.16	4.16	0.00	2.14	95.75	4.25		
06 LA S2 60 cm PL	2.52	18.54	22.33	0.00	0.00	2.67	2.67	0.00	4.63	97.20	2.80		
06 LA S2 65 cm PL	2.87	17.67	20.55	0.00	0.00	4.17	4.17	0.00	0.72	95.80	4.20		
06 LA S2 70 cm PL	4.29	23.64	27.92	0.00	0.00	3.90	3.90	0.00	3.51	95.96	4.04		
06 LA S2 75 cm PL	3.06	22.04	25.12	0.00	0.00	2.13	2.13	0.00	3.32	97.79	2.21		
06 LA S2 80 cm PL	2.99	16.57	19.55	0.00	0.00	2.24	2.24	0.00	4.93	97.65	2.35		
06 LA S2 85 cm PL	2.37	14.80	17.18	0.00	0.00	2.65	2.65	0.00	6.42	94.93	5.07		
06 LA S2 90 cm PL	2.80	21.47	24.27	0.00	0.00	2.37	2.37	0.00	0.54	97.61	2.39		
06 LA S2 95 cm PL	4.91	21.69	26.60	0.00	0.00	6.96	6.96	0.00	2.05	92.89	7.11		
06 La S2 100 cm PL	4.97	22.87	27.84	0.00	0.00	1.42	1.42	0.00	2.70	98.54	1.45		
06 La S2 110 cm PL	10.74	25.18	35.92	0.00	0.00	0.24	0.24	0.00	0.00	99.76	0.24		
06 La S2 115 cm PL	2.74	17.04	19.79	0.00	0.00	1.07	1.07	0.00	4.41	98.88	1.12		
06 La S2 120 cm PL	2.61	14.52	17.14	0.00	0.00	1.15	1.15	0.00	8.88	98.74	1.25		
06 La S2 125 cm PL	2.89	24.92	27.81	0.00	0.00	3.19	3.19	0.00	8.97	96.49	3.51		
06 La S2 135 cm PL	1.72	21.06	22.78	0.00	0.00	0.86	0.86	0.00	10.34	99.04	0.96		

Annexe 10 : Résultats des palynofacies, profil A-LA S2, échantillons PL et sols.
 % surfaciques des différentes particules observées (blanc) ;
 % surfaciques des sommes des particules LC, LCO, DG et éléments figurés
 et % de la MOF et MOR par rapport à la MO totale (gris).

Echantillons	MOA _{dc}	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
06 La S2 20 cm TF	8,58	10,72	0,00	0,00	38,99	1,30	40,29	0,52	9,81	0,00	0,91	0,39	11,63
06 La S2 25 cm TF	5,19	7,11	0,00	4,20	22,99	1,05	28,24	2,10	6,55	0,49	2,10	0,87	10,44
06 La S2 30 cm TF	8,34	6,76	0,00	1,66	18,54	5,23	25,43	2,70	9,66	0,87	0,50	1,20	14,93
06 La S2 35 cm TF	2,88	7,57	0,00	10,67	34,03	9,07	53,76	1,28	7,68	0,16	0,00	0,91	10,03
06 La S2 40 cm TF	8,93	16,69	0,00	2,48	11,82	2,73	17,02	4,05	12,81	0,50	0,58	0,99	18,93
06 La S2 45 cm TF	8,96	13,47	0,00	0,69	15,37	7,51	23,58	6,30	12,26	1,21	0,69	0,35	20,61
06 La S2 50 cm TF	4,58	18,63	0,00	5,93	18,63	2,19	26,95	4,99	9,05	0,62	1,56	1,04	17,27
06 La S2 55 cm TF	6,29	29,01	0,00	3,59	6,96	1,17	11,31	1,71	16,76	1,89	3,05	1,35	24,75
06 La S2 60 cm TF	1,11	20,57	0,00	0,00	23,51	1,11	24,62	2,53	15,30	2,13	2,23	2,53	24,72
06 La S2 65 cm TF	0,51	25,10	0,00	0,00	11,80	4,08	14,90	4,59	20,71	3,47	2,24	2,76	33,78
06 La S2 70 cm TF	3,81	18,83	0,00	0,00	11,80	3,58	15,38	10,73	21,93	2,15	4,48	3,69	38,97
06 La S2 75 cm TF	0,94	23,19	0,00	0,82	3,40	0,00	4,22	5,50	25,76	1,76	4,80	8,08	45,90
06 La S2 80 cm TF	3,88	22,83	0,00	0,72	11,37	0,69	13,09	5,87	25,99	2,35	2,35	0,00	36,55
06 La S2 85 cm TF	0,00	21,35	0,00	0,00	15,98	0,34	16,32	8,11	23,97	2,97	3,31	0,00	38,36
06 La S2 90 cm TF	0,27	25,72	0,00	1,08	12,18	1,35	14,62	3,43	22,56	1,26	3,70	0,00	30,96
06 La S2 95 cm TF	4,35	17,25	0,00	4,93	7,10	0,58	12,61	5,80	19,13	6,23	3,33	0,00	34,49
06 La S2 100 cm TF	2,92	24,21	0,00	1,17	5,05	0,00	6,22	3,79	24,86	4,47	2,43	2,72	38,27
06 La S2 110 cm TF	0,76	28,05	0,00	0,53	0,00	0,00	0,53	4,66	24,98	2,81	3,19	1,75	37,60
06 La S2 115 cm TF	2,29	19,07	0,00	4,83	1,57	0,48	6,88	8,57	22,40	4,10	3,74	0,00	38,81
06 La S2 120 cm TF	0,00	23,29	0,00	3,13	3,13	0,00	6,26	10,20	25,26	2,55	0,46	0,00	38,47
06 La S2 125 cm TF	0,00	27,00	0,00	0,65	1,57	0,00	2,21	8,85	26,82	4,79	2,49	1,38	44,33
06 La S2 135 cm TF	1,69	24,72	0,00	2,35	1,22	0,00	3,57	8,27	30,17	2,35	2,07	1,13	43,98
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SOPO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
06 La S2 20 cm TF	0,58	4,42	5,00	11,50	0,78	0,00	12,28	10,85	0,65	27,53	72,47		
06 La S2 25 cm TF	0,37	4,88	5,25	10,07	1,85	1,61	13,54	30,22	0,00	22,81	77,19		
06 La S2 30 cm TF	0,41	5,14	5,56	7,22	2,24	0,17	9,62	29,37	0,00	27,25	72,75		
06 La S2 35 cm TF	0,00	4,11	4,11	11,63	0,80	0,00	12,43	9,23	0,00	21,71	78,29		
06 La S2 40 cm TF	0,00	6,03	6,03	12,98	3,14	0,00	16,12	16,26	0,00	41,65	58,35		
06 La S2 45 cm TF	0,00	5,87	5,87	5,79	2,50	9,50	17,79	9,50	0,00	40,16	59,84		
06 La S2 50 cm TF	0,52	5,93	6,45	11,03	3,02	0,00	14,05	12,07	0,00	42,35	57,65		
06 La S2 55 cm TF	3,95	13,83	17,78	4,76	0,99	0,00	5,75	4,94	0,18	71,86	28,34		
06 La S2 60 cm TF	0,41	10,94	11,35	1,42	11,85	1,01	14,29	2,74	0,61	56,98	43,02		
06 La S2 65 cm TF	1,12	8,16	9,29	0,00	0,51	0,51	1,02	15,41	0,00	68,16	31,84		
06 La S2 70 cm TF	0,60	14,42	15,02	1,31	0,83	1,43	3,58	3,58	0,83	73,44	26,56		
06 La S2 75 cm TF	0,59	12,06	12,65	3,51	3,40	0,00	6,91	6,21	0,00	81,73	18,27		
06 La S2 80 cm TF	1,08	12,82	13,90	1,90	0,27	0,00	2,17	7,58	0,00	73,29	26,71		
06 La S2 85 cm TF	0,23	10,05	10,27	7,88	1,03	0,00	8,90	4,45	0,34	70,22	29,78		
06 La S2 90 cm TF	1,44	15,25	16,70	2,71	0,89	4,87	8,57	3,16	0,00	73,38	26,62		
06 La S2 95 cm TF	2,46	14,93	17,39	2,90	0,87	3,19	6,96	6,38	0,58	69,53	30,47		
06 La S2 100 cm TF	3,01	21,19	24,21	1,17	0,00	0,00	1,17	6,53	0,49	87,11	12,89		
06 La S2 110 cm TF	1,67	16,87	18,55	1,29	0,76	4,86	6,92	7,22	0,38	84,51	15,49		
06 La S2 115 cm TF	0,84	16,41	17,26	2,05	2,41	1,81	6,28	8,45	0,97	75,87	24,13		
06 La S2 120 cm TF	2,32	17,73	20,05	0,00	0,93	0,46	1,39	10,08	0,46	82,19	17,81		
06 La S2 125 cm TF	2,03	19,72	19,72	2,21	0,37	0,92	3,50	3,23	0,00	91,06	8,94		
06 La S2 135 cm TF	1,41	21,15	22,56	0,00	0,00	0,38	0,38	3,10	0,00	91,26	8,74		

Annexe 11 : Résultats des palynofacies, profil A-LA S2, échantillons TF.
 % surfaciques des différentes particules observées (blanc) ;
 % surfaciques des sommes des particules LC, LCO, DG et éléments figurés
 et % de la MOF et MOR par rapport à la MO totale (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCds	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOT	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
Laval MES 12/07/2006a	6.72	32.51	0.00	0.94	1.34	0.00	2.28	2.82	25.79	1.82	0.50	0.16	31.09
Laval MES 08/09/2006	0.00	30.92	0.00	0.00	0.76	0.00	0.76	6.30	30.53	1.53	2.67	3.63	44.66
Laval MES 25/09/2006	0.58	35.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.75	30.13	1.89	4.80	5.24	43.81
Laval MES 20/10/2006a	0.76	31.95	0.00	3.02	0.00	2.08	5.10	3.78	27.22	2.08	0.38	0.38	33.84
Laval MES 07/12/2006a	0.00	32.28	0.00	0.48	5.54	6.63	12.65	4.46	23.25	2.05	0.00	3.61	33.37
Laval MES 05/08/2007a	0.00	30.06	0.00	0.00	4.23	0.00	4.23	4.53	21.00	2.11	3.78	1.81	33.23
Laval MES 22/11/2007	0.00	26.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	27.74	6.90	0.00	3.33	39.11
Laval MES 11/01/2008a	0.00	31.75	0.00	0.00	8.32	0.00	8.32	4.75	28.20	3.06	0.00	2.04	39.05
Laval CF 24/09/1988a	0.71	31.44	0.00	0.00	4.02	0.47	4.49	3.31	24.11	7.57	5.20	3.31	43.50
Laval CF 20/11/2006a	0.00	30.12	0.00	1.83	3.05	0.00	4.89	3.52	26.15	3.67	0.00	2.75	36.09
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SOPO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
Laval MES 12/07/2006a	0.81	11.01	11.82	1.34	0.54	0.81	2.69	6.85	6.04	80.27	19.73		
Laval MES 08/09/2006	0.00	8.97	8.97	0.95	0.00	0.00	0.95	10.11	3.63	87.72	12.28		
Laval MES 25/09/2006	1.31	8.01	9.32	0.73	0.00	0.00	0.73	5.82	4.86	92.52	7.48		
Laval MES 20/10/2006a	1.13	12.67	13.80	3.02	0.00	2.27	5.29	7.75	1.51	80.81	19.19		
Laval MES 07/12/2006a	0.00	7.23	7.23	0.96	0.00	0.48	1.45	5.30	7.71	78.96	21.02		
Laval MES 05/08/2007a	0.76	7.85	8.61	3.32	0.60	0.00	3.93	6.19	13.75	83.96	16.64		
Laval MES 22/11/2007	0.97	9.29	10.26	4.85	1.11	0.00	5.96	6.10	11.79	86.32	13.68		
Laval MES 11/01/2008a	0.34	6.96	7.30	0.00	0.00	0.85	0.85	5.43	7.30	84.25	15.75		
Laval CF 24/09/1988a	0.00	12.29	12.29	0.00	2.60	0.95	3.55	0.00	4.02	90.89	9.11		
Laval CF 20/11/2006a	0.00	11.62	11.62	3.36	0.76	1.07	5.20	1.53	10.55	87.01	12.99		

Annexe 12 : Résultats des palynofacies, particules fluviatiles du bassin du Laval.
 % surfaciques des différentes particules observées (blanc) ;
 % surfaciques des sommes des particules LC, LCO, DG et éléments figurés
 et % de la MOF et MOR par rapport à la MO totale (gris).

Echantillons	MOA _{gc}	MOAr	MOAO	LCDs	LCDS	LCT	somme LC	LCOall	LCOT	LCOc	LCOconco	LCO re	somme LCO
06 BRU S1 OL	0.00	0.09	0.00	1.47	32.32	48.87	82.66	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.08
06 BRU S1 A 0 cm	7.82	3.65	0.69	0.69	21.48	0.23	22.40	5.33	0.17	0.00	1.45	3.36	10.31
06 BRU S1 A 5 cm	6.97	4.92	0.55	0.00	13.59	0.27	13.87	0.34	4.44	0.20	0.40	0.41	5.40
06 BRU S1 A 10 cm	6.75	14.20	0.70	0.79	11.72	0.79	11.72	0.79	9.93	3.48	0.50	3.57	18.27
06 BRU S1 A 15 cm	9.66	13.77	5.37	0.00	5.37	0.00	5.37	3.94	20.93	8.94	0.36	9.12	43.29
06 BRU S1 PL 20 cm	0.00	31.10	3.25	0.00	0.00	0.00	0.00	14.23	19.51	4.88	2.64	4.07	45.33
06 BRU S1 PL 25 cm	1.98	32.01	4.25	0.00	0.00	0.00	0.00	1.98	21.25	1.42	0.00	14.45	39.09
06 BRU S1 PL 30 cm	1.66	31.19	1.46	0.00	0.00	0.00	0.00	2.49	25.57	2.70	1.46	15.18	47.40
06 BRU S1 PL 35 cm	0.00	35.34	2.86	0.00	0.00	0.00	0.00	3.16	24.06	4.60	1.95	12.33	46.10
06 BRU S1 PL 40 cm	0.00	34.85	3.54	0.00	0.00	0.00	0.00	4.55	24.75	0.00	0.00	9.09	38.38
06 BRU S1 PL 45 cm	0.00	23.21	38.24	0.00	0.00	0.00	0.00	8.30	17.11	7.00	2.30	0.00	34.72
06 BRU S1 PL 50 cm	0.00	17.63	49.47	0.00	0.00	0.00	0.00	7.29	14.69	4.94	3.17	0.00	30.08
06 BRU S1 PL 55 cm	0.00	21.64	37.96	0.00	0.00	0.00	0.00	12.15	15.05	2.31	0.00	0.00	29.51
06 BRU S1 PL 60 cm	0.88	35.10	25.69	0.00	0.00	0.00	0.00	10.68	11.03	4.81	0.61	0.00	27.13
06 BRU S1 PL 65 cm	1.47	32.76	21.13	0.00	0.00	0.00	0.00	9.00	15.34	1.10	3.49	3.03	31.97
Echantillons	MOA_{gc}	MOAr	MOAO	LCDs	LCDS	LCT	somme LC	LCOall	LCOT	LCOc	LCOconco	LCO re	somme LCO
06 BRU S1 TF 20 cm	5.26	15.65	5.26	0.00	8.45	0.00	8.45	6.23	22.16	2.49	0.00	0.00	30.89
06 BRU S1 TF 25 cm	5.65	16.62	5.70	0.00	7.03	0.00	7.03	4.00	23.28	2.48	0.00	0.00	29.76
06 BRU S1 TF 35 cm	4.79	16.46	4.67	0.00	6.71	0.00	6.71	7.12	22.31	1.92	0.00	0.00	31.35
06 BRU S1 TF 40 cm	5.69	25.40	7.75	0.00	5.69	0.00	5.69	9.65	15.50	4.76	1.50	0.00	31.41
06 BRU S1 TF 50 cm	2.91	13.12	31.61	0.00	6.12	0.00	6.12	6.45	10.19	4.99	3.85	0.00	25.48
06 BRU S1 TF 65 cm	1.09	20.77	22.10	1.10	7.25	0.00	8.35	8.14	14.35	7.59	0.41	0.00	30.50
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SOPO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
06 BRU S1 OL	0.00	0.00	0.00	1.77	0.00	1.19	2.95	14.20	0.00	0.16	99.84		
06 BRU S1 A 0 cm	0.00	1.12	1.12	14.59	0.29	2.32	17.19	36.18	0.41	15.87	84.13		
06 BRU S1 A 5 cm	0.00	0.68	0.68	6.76	0.82	0.00	7.58	59.84	0.20	11.57	88.43		
06 BRU S1 A 10 cm	0.20	2.48	2.68	12.81	2.38	13.90	29.10	16.56	0.00	35.85	64.15		
06 BRU S1 A 15 cm	0.72	8.59	9.30	7.51	3.94	0.00	11.45	0.00	1.79	73.04	26.96		
06 BRU S1 PL 20 cm	1.83	15.45	17.28	0.00	1.63	0.00	1.63	0.00	1.42	98.35	1.65		
06 BRU S1 PL 25 cm	3.40	19.26	22.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	98.02	1.98		
06 BRU S1 PL 30 cm	2.08	12.06	14.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.16	98.26	1.74		
06 BRU S1 PL 35 cm	0.82	12.78	13.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.11	100.00	0.00		
06 BRU S1 PL 40 cm	1.01	19.70	20.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.53	100.00	0.00		
06 BRU S1 PL 45 cm	0.00	0.80	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.02	100.00	0.00		
06 BRU S1 PL 50 cm	0.00	0.47	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.35	100.00	0.00		
06 BRU S1 PL 55 cm	0.00	0.93	0.93	0.00	7.41	0.00	7.41	0.00	2.55	100.00	0.00		
06 BRU S1 PL 60 cm	0.18	0.88	1.05	0.00	2.28	0.00	2.28	0.00	7.88	99.05	0.95		
06 BRU S1 PL 65 cm	0.55	0.28	0.83	0.00	10.47	0.00	10.47	0.00	1.38	98.51	1.49		
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SOPO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
06 BRU S1 TF 20 cm	0.00	4.16	4.16	5.68	3.46	0.00	9.14	20.91	0.28	56.11	43.89		
06 BRU S1 TF 25 cm	0.00	5.03	5.03	4.13	4.27	0.00	8.40	21.08	0.53	57.82	42.38		
06 BRU S1 TF 35 cm	0.61	4.41	5.03	6.84	0.86	0.00	7.70	22.59	0.49	57.91	42.09		
06 BRU S1 TF 40 cm	0.41	5.84	6.25	3.53	1.67	0.00	5.20	11.24	1.36	71.79	28.21		
06 BRU S1 TF 50 cm	0.00	0.75	0.75	8.00	1.77	0.00	9.76	8.87	1.37	71.95	28.05		
06 BRU S1 TF 65 cm	0.00	1.38	1.38	0.97	4.71	0.00	5.68	5.90	4.35	78.14	21.86		

Annexe 13 : Résultats des palynofacies, profil A-BRU S1, échantillons PL, TF et sols.
 % surfaciques des différentes particules observées (blanc) ;
 % surfaciques des sommes des particules LC, LCO, DG et éléments figurés
 et % de la MOF et MOR par rapport à la MO totale (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	somme LCO
BRU s1 Lat surface	0.00	31.68	25.25	0.00	0.00	0.00	0.00	7.67	23.45	3.61	2.82	0.00	37.54
BRU s1 Lat	0.00	37.00	28.53	0.00	0.00	0.00	0.00	8.21	14.29	0.75	1.28	4.05	28.57
BRU s1 Lat	0.00	35.99	38.09	0.00	0.00	0.00	0.00	8.08	8.60	4.09	2.20	0.00	22.98
BRU s1 Lat	0.00	46.55	30.04	0.00	0.00	0.00	0.00	7.71	11.91	0.00	1.08	0.00	20.70
BRU s1 Lat	0.00	39.09	31.24	0.00	0.00	0.00	0.00	8.40	10.45	1.87	4.01	0.00	24.72
BRU s1 Lat	0.00	45.88	24.99	0.00	0.00	0.00	0.00	6.55	15.19	3.37	1.21	0.00	26.32
BRU s1 Lat	0.00	21.65	41.07	0.00	0.00	0.00	0.00	9.83	10.50	4.38	0.99	0.00	25.70
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
BRU s1 Lat surface	0.00	2.03	2.03	0.00	2.71	0.00	2.71	0.00	0.79	100.00	0.00		
BRU s1 Lat	0.00	0.75	0.75	0.00	1.81	0.00	1.81	0.00	2.34	100.00	0.00		
BRU s1 Lat	0.00	1.15	1.15	0.00	0.63	0.00	0.63	0.00	1.15	100.00	0.00		
BRU s1 Lat	0.00	2.03	2.03	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00	0.68	100.00	0.00		
BRU s1 Lat	0.00	0.56	0.56	0.00	1.39	0.00	1.39	0.00	2.80	100.00	0.00		
BRU s1 Lat	0.00	1.12	1.12	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	1.69	100.00	0.00		
BRU s1 Lat	0.00	0.33	0.33	0.00	7.52	0.00	7.52	0.00	3.72	100.00	0.00		

Annexe 14 : Résultats des palynofacies, BRU S1 Lat.
 % surfaciques des différentes particules observées (blanc) ;
 % surfaciques des sommes des particules LC, LCO, DG et éléments figurés
 et % de la MOF et MOR par rapport à la MO totale (gris).

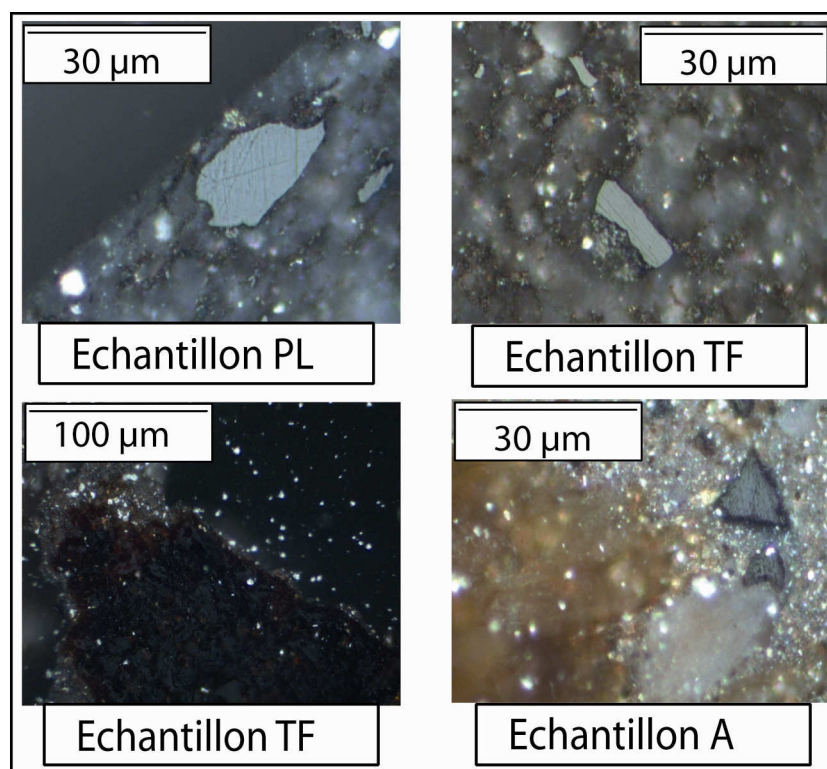
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDS	LCT	somme LC	LCOall	LCOT	LCOc	LCOconco	LCO re	sommelCO
06 BRU S3 PL 0 cm	0.00	44.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.41	28.70	4.06	2.32	1.16	44.64
06 BRU S3 PL 5 cm	0.00	38.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.37	37.42	0.00	6.24	0.00	50.33
06 BRU S3 PL 10 cm	0.00	38.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.39	40.86	1.02	0.00	0.77	52.69
06 BRU S3 PL 15 cm	0.00	38.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.42	36.85	7.42	1.80	2.70	49.49
06 BRU S3 PL 20 cm	0.00	34.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.58	39.72	0.00	3.10	0.00	52.39
06 BRU S3 PL 25 cm	0.00	37.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.24	34.29	0.95	1.43	1.90	53.81
06 BRU S3 PL 30 cm	0.00	30.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.59	35.19	1.50	3.22	2.36	53.86
06 BRU S3 PL 45 cm	0.00	30.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.59	35.19	1.50	3.22	2.36	53.86
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDS	LCT	somme LC	LCOall	LCOT	LCOc	LCOconco	LCO re	sommelCO
06 BRU S3 TF 0 cm	3.94	16.00	0.00	0.00	24.26	4.55	28.81	0.00	12.96	0.76	0.00	0.76	14.48
06 BRU S3 TF 5 cm	7.10	18.79	0.00	0.00	7.40	7.40	7.40	3.40	13.76	0.89	0.00	1.04	19.08
06 BRU S3 TF 10 cm	0.00	12.00	0.00	0.00	13.61	7.52	21.53	2.72	10.89	1.61	0.87	0.50	16.58
06 BRU S3 TF 15 cm	4.03	9.75	0.00	0.00	18.43	12.88	31.31	2.24	10.11	0.09	0.36	0.27	13.06
06 BRU S3 TF 20 cm	3.77	13.69	0.00	0.00	18.08	3.23	21.31	5.06	13.46	0.75	2.58	0.75	22.60
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDS	LCT	somme LC	LCOall	LCOT	LCOc	LCOconco	LCO re	sommelCO
BRU S3 Lat OL	1.53	0.00	0.00	5.95	33.47	48.09	87.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BRU S3 Lat A OH	0.67	0.00	0.00	7.05	47.13	7.84	62.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BRU S3 Lat A OF	0.39	0.00	0.00	6.38	33.75	0.39	40.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BRU S3 Lat A 0 cm	0.00	2.55	0.00	5.27	37.42	5.49	48.18	0.31	1.71	0.00	0.13	0.53	2.68
BRU S3 Lat A 5 cm	5.91	10.91	0.00	0.00	6.31	15.77	22.08	2.50	14.98	0.00	0.00	0.00	17.48
BRU S3 Lat PL 10 cm	0.00	55.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.36	20.46	1.16	1.93	2.70	38.61
BRU S3 Lat PL 20 cm	0.00	47.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.06	22.59	1.27	3.81	1.52	33.25
BRU S3 Lat PL 30 cm	0.00	39.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.01	27.48	8.55	0.00	3.46	48.50
BRU S3 Lat PL 40 cm	0.00	45.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.95	35.43	1.12	0.00	2.47	45.96
BRU S3 Lat PL 50 cm	0.00	29.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.27	34.16	2.48	1.42	2.83	54.16
BRU S3 Lat PL 60 cm	0.00	26.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.06	36.06	4.26	2.60	0.95	52.48
BRU S3 Lat PL 700 cm	0.00	32.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.13	40.56	3.73	1.63	2.33	53.38
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
06 BRU S3 PL 0 cm	0.00	8.70	8.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.32	100.00	0.00		
06 BRU S3 PL 5 cm	0.00	8.69	8.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.34	100.00	0.00		
06 BRU S3 PL 10 cm	0.00	5.88	5.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.56	100.00	0.00		
06 BRU S3 PL 15 cm	0.00	9.45	9.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.46	100.00	0.00		
06 BRU S3 PL 20 cm	0.90	10.11	11.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.47	100.00	0.00		
06 BRU S3 PL 25 cm	0.56	7.61	8.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.07	100.00	0.00		
06 BRU S3 PL 30 cm	0.00	6.90	6.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.67	100.00	0.00		
06 BRU S3 PL 45 cm	0.64	10.09	10.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.36	100.00	0.00		
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
06 BRU S3 TF 0 cm	0.00	0.99	0.99	9.17	0.00	4.55	13.72	21.76	0.30	31.56	68.44		
06 BRU S3 TF 5 cm	0.00	2.37	2.37	8.58	0.00	0.00	8.58	36.69	0.00	40.24	59.76		
06 BRU S3 TF 10 cm	0.25	1.36	1.61	4.83	0.00	0.00	4.83	43.19	0.25	30.27	69.73		
06 BRU S3 TF 15 cm	0.00	0.36	0.36	5.90	1.16	3.58	10.64	30.68	0.18	23.21	76.79		
06 BRU S3 TF 20 cm	0.00	1.40	1.40	6.46	1.18	0.00	7.64	28.20	1.18	38.34	61.66		
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
BRU S3 Lat OL	0.00	0.00	0.00	1.70	2.63	3.40	7.73	3.23	0.00	0.00	100.00		
BRU S3 Lat A OH	0.00	0.00	0.00	2.72	1.34	0.67	4.74	32.58	0.00	0.00	100.00		
BRU S3 Lat A OF	0.00	0.00	0.00	6.09	0.00	0.68	7.74	51.35	0.00	0.00	100.00		
BRU S3 Lat A 0 cm	0.00	0.35	0.35	5.40	0.44	0.00	5.84	40.40	0.00	5.58	94.42		
BRU S3 Lat A 5 cm	0.00	3.29	3.29	10.25	0.00	0.00	10.25	28.25	1.84	32.26	67.74		
BRU S3 Lat PL 10 cm	0.00	5.41	5.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00		
BRU S3 Lat PL 20 cm	1.02	12.43	13.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.09	100.00	0.00		
BRU S3 Lat PL 30 cm	0.00	10.62	10.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	100.00	0.00		
BRU S3 Lat PL 40 cm	0.00	4.48	4.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.04	100.00	0.00		
BRU S3 Lat PL 50 cm	0.00	6.19	6.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.44	100.00	0.00		
BRU S3 Lat PL 60 cm	0.00	19.15	19.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.85	100.00	0.00		
BRU S3 Lat PL 700 cm	0.00	6.76	6.76	0.00	0.00	1.40	1.40	0.00	6.29	98.51	1.49		

Annexe 15 : Résultats des palynofacies, profils A-BRU S3 et BRU S3 Lat, échantillons PL, TF et sols.
 % surfaciques des différentes particules observées (blanc) ;
 % surfaciques des sommes des particules LC, LCO, DG et éléments figurés
 et % de la MOF et MOR par rapport à la MO totale (gris).

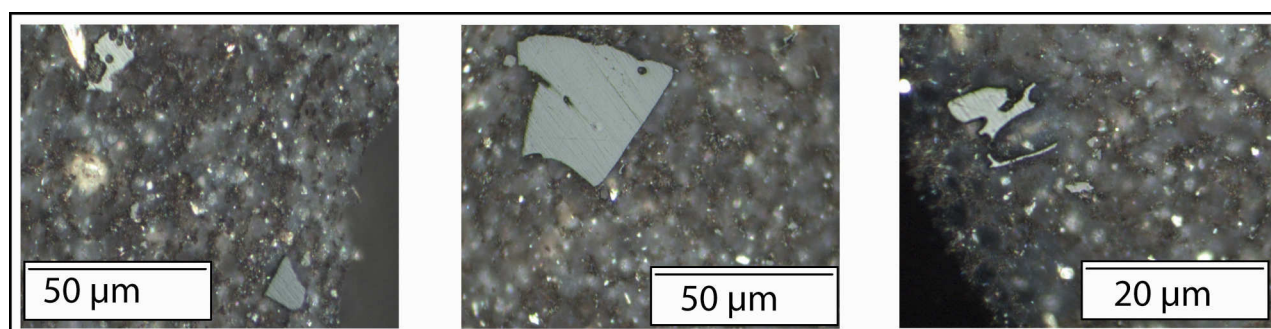
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
Brusquet MES 12/07/2006b	0.00	18.60	8.22	1.70	1.51	2.36	5.57	13.31	25.40	2.93	1.32	2.46	45.42
Brusquet MES 24/09/2006	2.50	9.80	8.33	2.34	13.83	3.86	20.03	2.34	19.49	3.54	1.96	0.65	27.98
Brusquet CF 24/09/1999a	0.89	15.45	7.54	2.55	10.86	0.00	13.41	12.64	10.60	4.34	3.70	0.89	32.18
Brusquet CF 20/11/2006 Aalénien sup	1.46	21.19	26.66	0.00	0.68	0.00	1.37	3.61	28.13	4.59	1.76	2.73	40.82
Brusquet CF 20/11/2006 Tourcen	0.00	64.53	0.00	0.00	1.42	0.00	1.42	6.95	15.83	2.39	0.60	0.30	26.06
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
MES Moulin 08/09/2006a	0.00	31.63	0.00	0.00	4.68	1.56	6.24	5.15	28.05	4.06	5.15	1.87	42.28
MES Moulin 24/09/2006	2.02	32.46	0.00	0.78	1.86	7.61	10.25	10.40	18.17	3.42	3.73	1.24	36.96
MES Moulin 20/10/2006a	0.00	33.20	0.00	0.00	2.36	0.00	2.36	4.91	24.95	5.70	2.95	0.79	38.29
MES Moulin 07/12/2006	0.00	32.29	0.00	0.48	5.54	6.63	12.85	4.46	23.25	2.05	0.00	3.61	33.37
MES Moulin 05/06/2007a	0.00	23.76	0.00	0.00	0.94	3.76	4.71	8.00	19.53	6.35	1.88	1.88	37.65
MES Moulin 23/11/2007	1.30	31.60	0.00	0.65	0.98	0.00	1.63	7.33	24.92	3.31	0.81	1.79	38.76
MES Moulin 12/01/2008a	0.00	31.75	0.00	0.00	8.32	0.00	8.32	4.75	29.20	3.06	0.00	2.04	39.05
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
Brusquet MES 12/07/2006b	0.00	3.31	3.31	0.85	0.66	0.57	2.08	14.83	1.96	77.07	22.93		
Brusquet MES 24/09/2006	0.00	0.93	0.93	1.69	0.80	6.15	8.44	20.36	1.63	47.81	52.19		
Brusquet CF 24/09/1999a	0.26	2.55	2.81	6.00	10.22	0.00	16.22	4.34	7.15	62.45	37.55		
Brusquet CF 20/11/2006 Aalénien sup	0.39	0.68	1.07	0.39	0.00	0.00	0.39	2.94	4.49	93.97	6.03		
Brusquet CF 20/11/2006 Tourcen	0.00	0.75	0.75	1.12	0.00	0.00	1.12	0.37	5.75	96.91	3.09		
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
MES Moulin 08/09/2006a	0.00	8.27	8.27	3.59	0.78	0.00	4.37	2.81	4.21	85.99	14.01		
MES Moulin 24/09/2006	0.00	8.07	8.07	0.00	0.47	0.62	1.09	4.04	5.12	81.67	18.33		
MES Moulin 20/10/2006a	0.39	10.61	11.00	2.95	0.00	0.00	2.95	2.75	8.45	91.20	8.80		
MES Moulin 07/12/2006	0.00	7.23	7.23	0.96	0.00	0.48	1.45	5.30	7.71	78.98	21.02		
MES Moulin 05/06/2007a	1.65	14.35	16.00	2.59	0.00	0.00	2.59	4.71	10.59	86.58	13.42		
MES Moulin 23/11/2007	0.00	12.87	12.87	1.14	0.00	0.00	1.14	10.26	2.44	85.31	14.69		
MES Moulin 12/01/2008a	0.34	6.96	7.30	0.00	0.00	0.85	0.85	5.43	7.30	84.25	15.75		

Annexe 16 : Résultats des palynofacies, particules fluviatiles du Brusquet et du Moulin.
 % surfaciques des différentes particules observées (blanc) ;
 % surfaciques des sommes des particules LC, LCO, DG et éléments figurés
 et % de la MOF et MOR par rapport à la MO totale (gris).

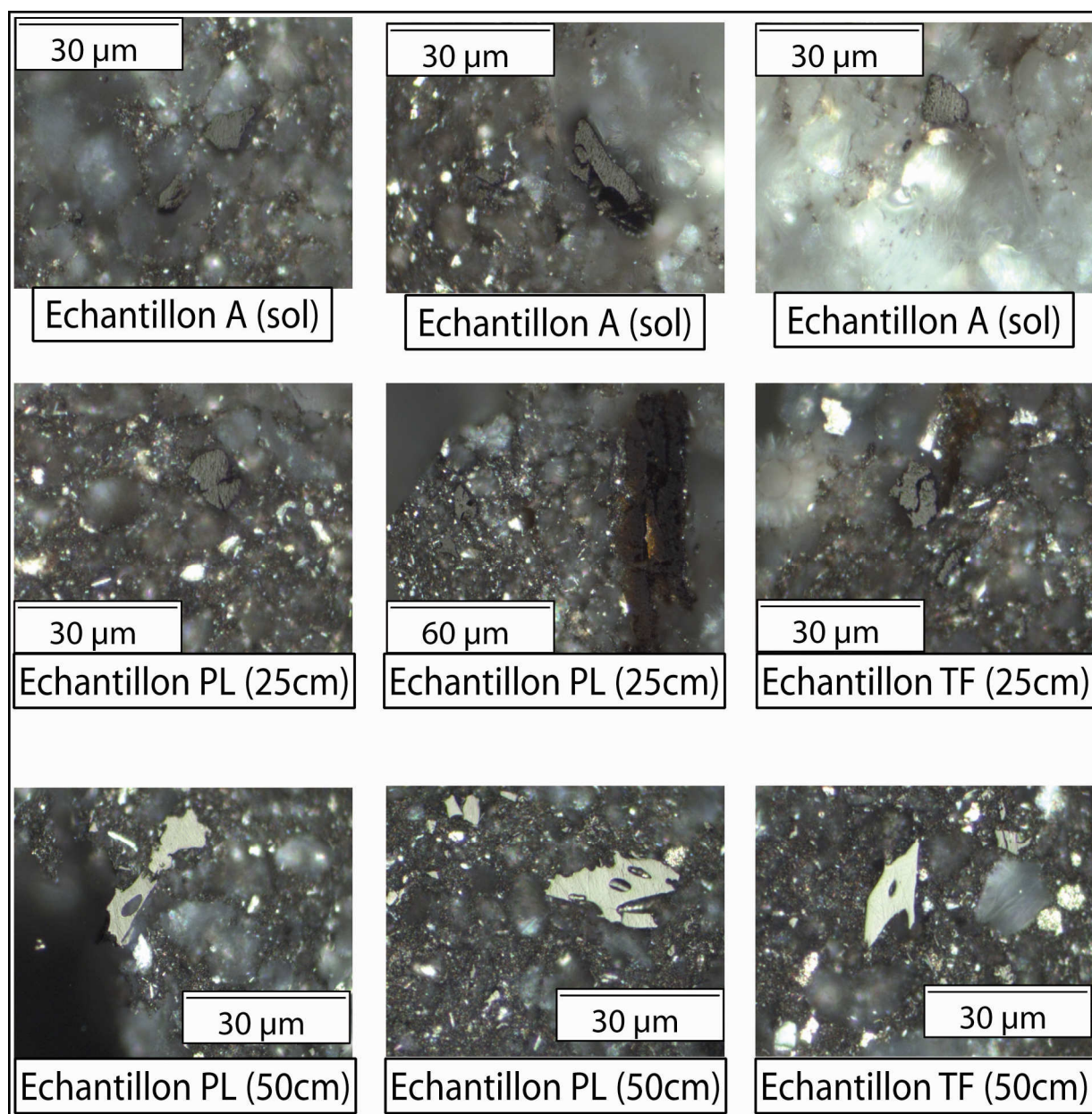
Annexes 17 à 21 : Particules observées dans les différents échantillons étudiés (sections polies, lumière réfléchie)



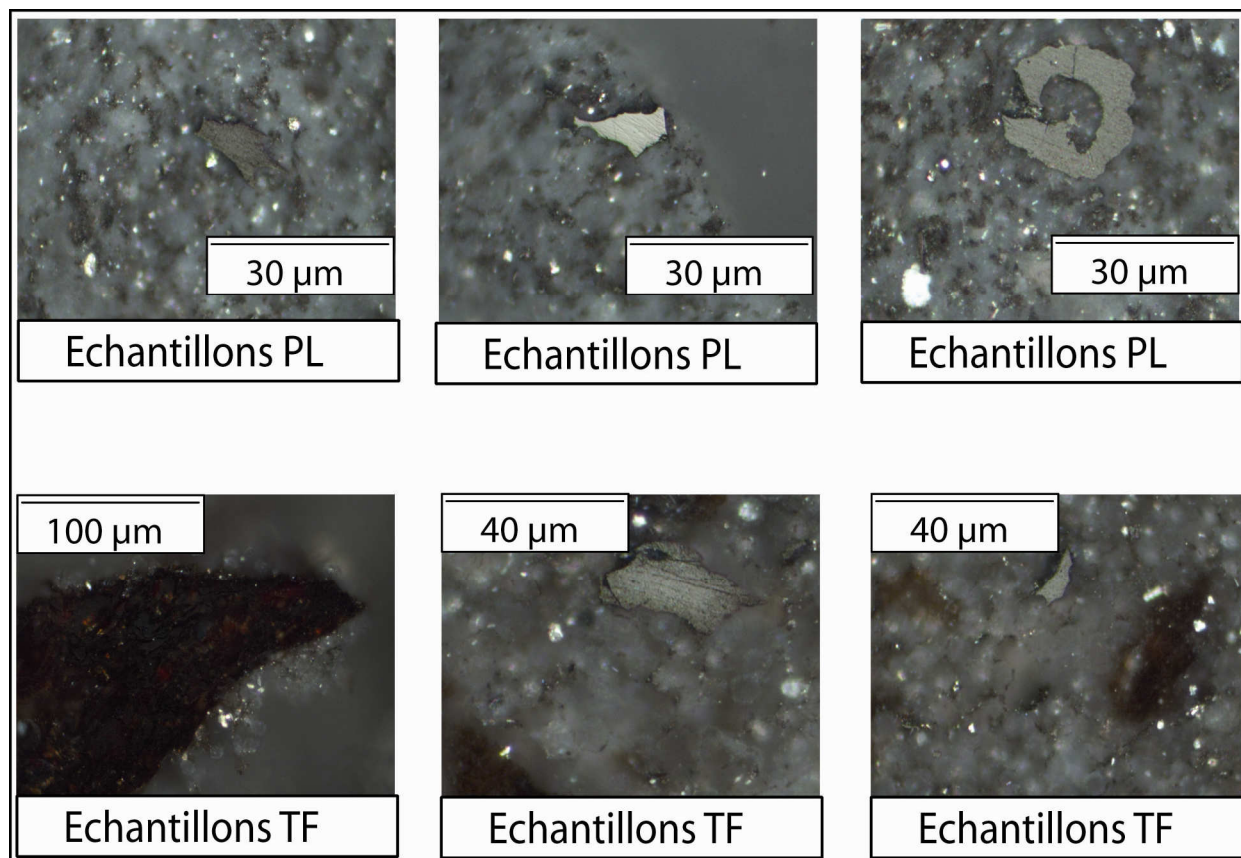
Annexe 17 : Quelques particules observées au sein des échantillons PL, TF et A du bassin versant du Laval (profils 06-LA S2, sections polies, lumière réfléchie).



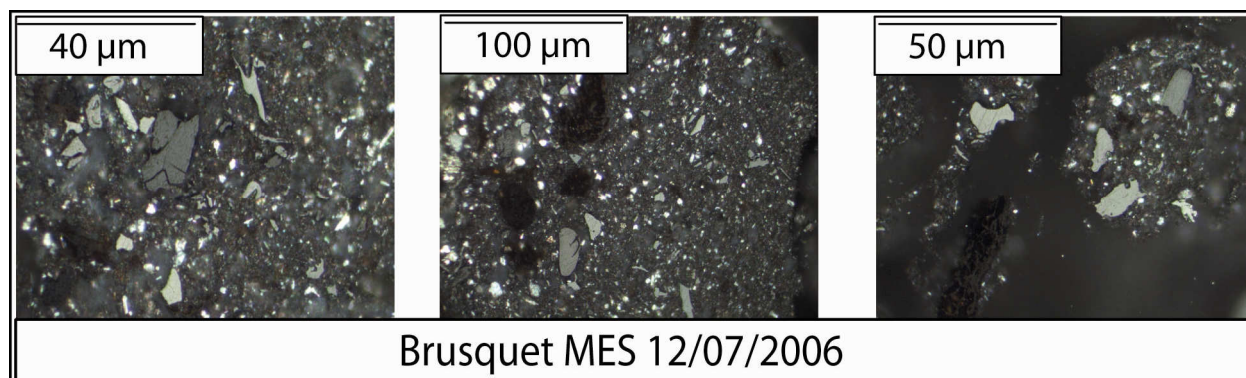
Annexe 18 : Quelques particules observées au sein des échantillons de MES du bassin versant du Laval (sections polies, lumière réfléchie).



Annexe 19 : Quelques particules observées au sein des échantillons PL TF et A du profil 06-BRU S1 (sections polies, lumière réfléchie).



Annexe 20 : Quelques particules observées au sein des échantillons PL TF et A du profil 06-BRU S3 (sections polies, lumière réfléchie).



Annexe 21 : Quelques particules observées au sein de l'échantillon Brusquet MES 12/07/2006 (sections polies, lumière réfléchie).

Annexes 22 à 28 : Principaux paramètres issus de la pyrolyse Rock-Eval

Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
A-LAV1 6 cm	1.73	406	180	254	0.46	1.27
A-LAV1 12 cm	1.43	401	163	287	0.38	1.05
A-LAV1 18 cm	0.94	394	146	319	0.24	0.70
A-LAV1 24 cm	0.64	390	122	375	0.16	0.48
A-LAV1 30 cm	0.55	392	109	382	0.14	0.41
A-LAV1 36 cm	0.47	390	104	426	0.12	0.35
A-LAV1 42 cm	0.37	394	92	459	0.10	0.27
A-LAV1 48 cm	0.30	401	70	500	0.08	0.22
A-LAV1 54 cm	0.27	400	70	556	0.07	0.20
A-LAV1 60 cm	0.30	397	63	500	0.07	0.23
Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
06 LA A 0 cm	0.44	522	28	193	0.03	0.41
06 LA A 5 cm	0.48	523	18	178	0.03	0.45
06 LA A 10 cm	0.43	528	16	199	0.03	0.40
06 LA A 15 cm	0.38	527	18	175	0.02	0.36
06 LA A 20 cm	0.38	532	18	250	0.03	0.35
06 LA A 25 cm	0.46	526	13	167	0.01	0.45
06 LA A 30 cm	0.43	525	14	176	0.03	0.40
06 LA A 35 cm	0.34	528	17	278	0.03	0.31
06 LA A 40 cm	0.30	531	16	281	0.03	0.27
06 LA A 45 cm	0.36	527	14	215	0.02	0.34
06 LA A 50 cm	0.34	536	12	278	0.02	0.32
06 LA A 55 cm	0.34	528	15	250	0.02	0.32
06 LA A 60 cm	0.47	521	17	182	0.03	0.44
06 LA A 65 cm	0.42	535	16	227	0.02	0.40
06 LA A 70 cm	0.47	525	12	165	0.02	0.45
Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
LA A R 0 cm	0.45	522	13	100	0.02	0.43
LA A R 10 cm	0.47	521	13	113	0.02	0.45
LA A R 20 cm	0.47	516	17	98	0.03	0.44
LA A R 25 cm	0.44	520	16	109	0.02	0.42
LA A R 30 cm	0.34	521	15	129	0.02	0.32
LA A R 35 cm	0.35	520	17	126	0.02	0.33
LA A R 40 cm	0.34	526	15	144	0.02	0.32
LA A R 45 cm	0.32	526	16	159	0.02	0.30
LA A R 50 cm	0.29	519	17	172	0.02	0.27
LA A R 55 cm	0.31	523	16	165	0.02	0.29
LA A R 60 cm	0.49	518	12	102	0.03	0.46
LA A R 65 cm	0.47	524	15	102	0.02	0.45
LA A R 70 cm	0.46	517	20	100	0.02	0.44

Annexe 22 : Paramètres RE 6 des échantillons des profils A-LAV1, 06-LA A et LA A R

Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
06 LA S2 OL	40.67	336	446	129	18.10	22.60
06 LA S2 OH	25.55	330	309	140	7.95	17.60
06 LA S2 A	1.46	410	164	212	0.34	1.12
06 LA S2 20 cm PL	0.43	497	23	163	0.04	0.39
06 LA S2 25 cm PL	0.37	505	16	162	0.03	0.34
06 LA S2 30 cm PL	0.39	509	15	154	0.03	0.36
06 LA S2 35 cm PL	0.32	505	19	156	0.02	0.30
06 LA S2 40 cm PL	0.34	502	18	206	0.03	0.31
06 LA S2 45 cm PL	0.43	508	16	140	0.03	0.40
06 LA S2 50 cm PL	0.38	514	16	132	0.02	0.36
06 LA S2 55 cm PL	0.38	510	13	158	0.02	0.36
06 LA S2 60 cm PL	0.38	516	16	184	0.02	0.36
06 LA S2 65 cm PL	0.39	516	15	179	0.03	0.36
06 La S2 70 cm PL	0.38	505	18	158	0.03	0.35
06 La S2 75 cm PL	0.41	516	12	146	0.02	0.39
06 La S2 80 cm PL	0.41	516	12	122	0.02	0.39
06 La S2 85 cm PL	0.40	517	15	150	0.03	0.37
06 La S2 90 cm PL	0.43	517	14	116	0.02	0.41
06 La S2 95 cm PL	0.44	516	11	114	0.03	0.41
06 La S2 100 cm PL	0.43	516	12	116	0.02	0.41
06 La S2 110 cm PL	0.64	517	12	94	0.03	0.61
06 La S2 115 cm PL	0.62	520	15	65	0.02	0.60
06 La S2 120cm PL	0.69	530	16	72	0.02	0.67
06 La S2 125 cm PL	0.44	422	14	159	0.03	0.41
06 La S2 135 cm PL	0.45	516	13	111	0.02	0.43
Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
06 LA S2 20 cm TF	1.13	400	128	212	0.24	0.89
06 La S2 25 cm TF	1.05	398	111	210	0.20	0.85
06 La S2 30 cm TF	1.01	418	122	238	0.21	0.80
06 La S2 35 cm TF	0.92	400	109	217	0.17	0.75
06 La S2 40 cm TF	0.77	383	94	247	0.14	0.63
06 La S2 45 cm TF	0.93	383	105	215	0.17	0.76
06 La S2 50 cm TF	1.40	400	123	186	0.27	1.13
06 La S2 55 cm TF	0.64	390	62	219	0.09	0.55
06 La S2 60 cm TF	0.61	391	61	54	0.09	0.52
06 La S2 65 cm TF	0.54	413	52	24	0.07	0.47
06 La S2 70 cm TF	0.47	411	36	43	0.06	0.41
06 La S2 75 cm TF	0.54	393	50	37	0.07	0.47
06 La S2 80 cm TF	0.62	396	58	396	0.09	0.53
06 La S2 85 cm TF	0.62	394	56	394	0.09	0.53
06 La S2 90 cm TF	0.64	391	41	391	0.08	0.56
06 La S2 95 cm TF	0.55	492	27	492	0.05	0.50
06 La S2 100 cm TF	0.52	386	29	386	0.05	0.47
06 La S2 110 cm TF	0.60	405	38	405	0.07	0.53
06 La S2 115 cm TF	0.59	509	17	509	0.04	0.55
06 La S2 120cm TF	0.60	506	20	506	0.04	0.56
06 La S2 125 cm TF	0.45	520	11	520	0.03	0.42
06 La S2 135 cm TF	0.49	511	14	511	0.02	0.47

Annexe 23 : Paramètres RE 6 des échantillons du profil 06-LA S2

Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
Laval MES 03/05/2002a	0.55	520	25	87	0.03	0.52
Laval MES 03/05/2003b	0.51	515	33	100	0.03	0.48
Laval MES 13/05/2002	0.55	506	36	84	0.04	0.51
Laval MES 24/05/2002	0.51	521	27	100	0.03	0.48
Laval MES 26/08/2002	0.53	510	34	89	0.04	0.49
Laval MES 02/09/2002	0.52	514	27	96	0.03	0.49
Laval MES 05/09/2002	0.50	511	30	122	0.03	0.47
Laval MES 23/10/2002	0.55	513	24	95	0.03	0.52
Laval MES 06/07/2006	0.47	577	21	104	0.03	0.44
Laval MES 07/07/2006	0.56	561	25	112	0.04	0.52
Laval MES 12/07/2006b	0.65	503	23	85	0.05	0.60
Laval MES 12/07/2006a	0.56	562	20	84	0.03	0.53
Laval MES 18/07/2006b	0.46	573	19	104	0.02	0.46
Laval MES 18/07/2006a	0.51	575	20	95	0.03	0.48
Laval MES 08/09/2006	0.62	510	19	111	0.04	0.58
Laval MES 15/09/2006	0.52	515	25	92	0.03	0.49
Laval MES 25/09/2006	0.58	514	19	76	0.03	0.55
Laval MES 20/10/2006a	0.54	517	26	106	0.03	0.51
Laval MES 20/10/2006b	0.53	519	28	89	0.03	0.50
Laval MES 20/10/2006c	0.52	514	29	133	0.03	0.49
Laval MES 07/12/2006a	0.52	555	25	94	0.03	0.49
Laval MES 07/12/2006b	0.52	515	23	100	0.04	0.48
Laval MES 04/06/2007	0.54	423	33	126	0.04	0.50
Laval MES 05/06/2007b	0.60	512	32	115	0.04	0.56
Laval MES 05/06/2007a	0.62	520	24	85	0.03	0.59
Laval MES 16/09/2007	0.53	529	21	97	0.03	0.50
Laval MES 22/11/2007	0.48	536	19	85	0.02	0.46
Laval MES 11/01/2008a	0.61	518	23	84	0.04	0.57
Laval MES 11/01/2008b	0.55	519	24	85	0.03	0.52
Laval MES 11/01/2008c	0.53	516	28	85	0.03	0.50
Laval CF 24/09/1999a	0.49	589	14	104	0.02	0.47
Laval CF 24/09/1999b	0.46	600	11	85	0.02	0.44
Laval CF 24/09/1999c	0.59	511	29	81	0.03	0.56
Laval CF 20/11/2006a	0.42	587	14	69	0.02	0.40
Laval CF 20/11/2006b	0.45	575	18	67	0.02	0.43
Laval CF 20/11/2006c	0.60	546	22	35	0.02	0.58
Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
LAR2	0.45	500	27	100	0.03	0.42
LAR3	0.62	495	23	26	0.02	0.60
LAR4	0.57	573	19	32	0.02	0.55
LAR5	0.36	578	25	89	0.02	0.34

*Annexe 24 : Paramètres RE 6 des particules fluviatiles du Laval
et des échantillons LAR2, LAR3, LAR4, LAR5.*

Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
06 BRU S1 OL	43.66	333	466	94	19.72	23.94
06 BRU S1 A 0 cm	1.49	349	145	163	0.30	1.19
06 BRU S1 A 5 cm	1.33	401	175	187	0.31	1.02
06 BRU S1 A 10 cm	0.62	394	124	242	0.13	0.49
06 BRU S1 A 15 cm	0.29	510	10	190	0.02	0.27
06 BRU S1 PL 20 cm	0.30	497	17	173	0.02	0.28
06 BRU S1 PL 25 cm	0.32	493	12	131	0.02	0.30
06 BRU S1 PL 30 cm	0.26	526	12	119	0.02	0.24
06 BRU S1 PL 35 cm	0.24	531	8	158	0.01	0.23
06 BRU S1 PL 40 cm	0.21	547	10	195	0.01	0.20
06 BRU S1 PL 45 cm	0.71	606	4	32	0.01	0.70
06 BRU S1 PL 50 cm	0.71	605	6	20	0.01	0.70
06 BRU S1 PL 55 cm	0.81	606	6	12	0.01	0.80
06 BRU S1 PL 60 cm	0.84	491	7	14	0.01	0.83
06 BRU S1 PL 65 cm	0.70	606	6	26	0.01	0.69
Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
06 BRU S1 TF 20 cm	0.42	388	64	214	0.06	0.36
06 BRU S1 TF 25 cm	0.45	389	71	211	0.06	0.39
06 BRU S1 TF 35 cm	0.52	390	48	154	0.05	0.47
06 BRU S1 TF 40 cm	0.46	391	39	211	0.04	0.42
06 BRU S1 TF 50 cm	0.79	365	6	38	0.02	0.77
06 BRU S1 TF 65 cm	0.76	404	21	63	0.04	0.72
Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
BRU S1 Lat surface	0.69	392	33	77	0.04	0.65
BRU S1 Lat 0 cm	0.68	605	6	18	0.01	0.67
BRU S1 Lat 10 cm	0.75	605	4	19	0.01	0.74
BRU S1 Lat 30 cm	0.79	607	4	29	0.01	0.78
BRU S1 Lat 40 cm	0.62	606	6	27	0.01	0.61
BRU S1 Lat 50 cm	0.75	607	4	31	0.01	0.74
BRU S1 Lat 60 cm	0.86	606	7	36	0.01	0.85

Annexe 25 : Paramètres RE 6 des échantillons des profils 06-BRU S1 et BRU S1 Lat

Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
06 BRU S3 PL 0 cm	0.37	508	16	154	0.02	0.35
06 BRU S3 PL 5 cm	0.37	511	14	138	0.02	0.35
06 BRU S3 PL 10 cm	0.39	508	18	151	0.03	0.36
06 BRU S3 PL 15 cm	0.36	501	17	142	0.03	0.33
06 BRU S3 PL 20 cm	0.36	517	11	136	0.02	0.34
06 BRU S3 PL 25 cm	0.39	605	13	110	0.02	0.37
06 BRU S3 PL 30 cm	0.36	605	11	192	0.03	0.33
06 BRU S3 PL 45 cm	0.39	600	10	92	0.03	0.36
Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
06 BRU S3 TF 0 cm	1.37	418	199	196	0.35	1.02
06 BRU S3 TF 5 cm	0.97	421	137	200	0.19	0.78
06 BRU S3 TF 10 cm	1.69	421	198	212	0.44	1.25
06 BRU S3 TF 15 cm	1.35	420	184	202	0.32	1.03
06 BRU S3 TF 20 cm	0.97	417	146	199	0.21	0.76
Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
BRU S3 Lat OL	27.73	340	491	163	13.46	13.97
BRU S3 Lat A OF	14.30	332	392	192	7.98	8.32
BRU S3 Lat A OH	16.20	327	366	196	6.44	9.76
BRU S3 Lat A 0 cm	4.51	432	364	203	1.78	2.73
BRU S3 Lat A 5 cm	1.44	407	217	270	0.43	1.01
BRU S3 Lat PL 10 cm	0.36	385	25	189	0.03	0.33
BRU S3 Lat PL 20 cm	0.34	492	15	144	0.02	0.32
BRU S3 Lat PL 30 cm	0.37	605	11	127	0.02	0.35
BRU S3 Lat PL 40 cm	0.28	444	18	143	0.02	0.26
BRU S3 Lat PL 50 cm	0.35	499	11	120	0.02	0.33
BRU S3 Lat PL 60 cm	0.34	374	15	162	0.02	0.32
BRU S3 Lat PL 70 cm	0.36	441	17	128	0.02	0.34

Annexe 26 : Paramètres RE 6 des échantillons des profils 06-BRU S3 et BRU S3 Lat

	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	mg CO ₂ .g ⁻¹ C	PC %	RC%
Brusquet MES 03/05/2002a	1.00	388	75	136	0.12	0.88
Brusquet MES 03/05/2002b	1.08	395	86	147	0.14	0.94
Brusquet MES 23/05/2002	1.08	389	109	158	0.17	0.91
Brusquet MES 25/05/2002	1.32	405	378	177	0.52	0.80
Brusquet MES 04/09/2002a	1.18	397	124	140	0.20	0.98
Brusquet MES 04/09/2002b	0.74	384	85	153	0.10	0.64
Brusquet MES 17/09/2002	1.07	391	163	159	0.24	0.83
Brusquet MES 12/07/2006a	0.74	382	58	166	0.09	0.65
Brusquet MES 12/07/2006b	1.07	387	82	183	0.15	0.92
Brusquet MES 12/07/2006d	0.84	384	50	163	0.09	0.75
Brusquet MES 24/09/2006	1.06	389	91	187	0.16	0.90
Brusquet MES 21/10/2006	1.06	389	96	207	0.17	0.89
Brusquet MES 06/12/2006	1.21	387	100	193	0.20	1.01
Brusquet MES 17/12/2006	1.03	381	117	262	0.23	0.80
Brusquet CF 24/09/1999a	0.75	413	32	140	0.06	0.69
Brusquet CF 24/09/1999b	0.77	400	47	175	0.08	0.69
Brusquet CF 24/09/1999c	0.86	398	64	171	0.11	0.75
Brusquet CF 24/09/1999d	0.57	348	11	100	0.03	0.54
Brusquet CF 20/11/2006 Aalénien sup	0.46	605	13	76	0.44	76.00
Brusquet CF 20/11/2006 Toarcien	0.69	345	7	62	0.66	62.00
B1	0.52	336	12	21	0.01	0.51
B2	0.76	335	8	24	0.01	0.75
B3	0.79	315	6	30	0.02	0.77
B4	0.74	352	7	53	0.03	0.71
B5	0.69	284	7	41	0.02	0.67
B6	0.57	350	21	56	0.03	0.54

Annexe 27: Paramètres RE 6 des particules fluviales du Brusquet et des échantillons B1, B2, B3, B4 et B5.

Echantillons	COT %	Tmax °C	IH (mg HC.g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ .g ⁻¹ COT)	PC %	RC%
MES Moulin 13/05/2002	0.60	386	72	128	0.07	0.53
MES Moulin 03/05/2002	0.56	575	30	100	0.3	0.53
MES Moulin 05/08/2002	0.53	566	28	132	0.04	0.49
MES Moulin 27/08/2002a	0.54	387	43	117	0.04	0.50
MES Moulin 27/08/2002b	0.51	380	29	104	0.03	0.48
MES Moulin 02/09/2002	0.56	380	45	118	0.04	0.52
MES Moulin 05/09/2002	0.55	372	38	105	0.04	0.51
MES Moulin 12/09/2002	0.54	368	35	122	0.05	0.49
MES Moulin 06/07/2006a	0.53	572	21	98	0.03	0.50
MES Moulin 06/07/2006b	0.62	410	45	129	0.06	0.56
MES Moulin 12/07/2006	0.54	584	19	117	0.03	0.51
MES Moulin 08/09/2006a	0.54	436	24	102	0.04	0.50
MES Moulin 08/09/2006b	0.54	571	20	111	0.04	0.50
MES Moulin 15/09/2006a	0.53	516	23	89	0.03	0.50
MES Moulin 15/09/2006b	0.53	584	21	87	0.03	0.50
MES Moulin 24/09/2006	0.52	559	19	0	0.48	115.00
MES Moulin 20/10/2006a	0.53	382	45	160	0.05	0.48
MES Moulin 20/10/2006b	0.58	367	52	109	0.05	0.53
MES Moulin 07/12/2006	0.51	581	22	118	0.04	0.47
MES Moulin 05/06/2007a	0.58	578	17	116	0.03	0.55
MES Moulin 05/06/2007b	0.52	388	40	102	0.04	0.48
MES Moulin 23/11/2007	0.53	568	21	100	0.03	0.50
MES Moulin 12/01/2008a	0.58	410	33	102	0.04	0.54
MES Moulin 12/01/2008b	0.50	580	26	104	0.03	0.47

Annexe 28 : Paramètres RE 6 des échantillons de particules fluviales du bassin versant du Moulin

Annexes 29 à 37: Palynofacies quantitatif

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOail	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	somme LCO
A-LAV1 6 cm	0.167	0.060	0.000	0.833	0.378	0.204	1.415	0.000	0.125	0.011	0.016	0.027	0.180
A-LAV1 12 cm	0.085	0.076	0.000	0.238	0.129	0.112	0.479	0.023	0.116	0.002	0.000	0.013	0.154
A-LAV1 18 cm	0.091	0.041	0.000	0.129	0.003	0.164	0.296	0.004	0.103	0.000	0.009	0.000	0.116
A-LAV1 24 cm	0.046	0.062	0.000	0.004	0.004	0.156	0.165	0.005	0.122	0.000	0.014	0.000	0.142
A-LAV1 30 cm	0.071	0.105	0.000	0.064	0.008	0.110	0.182	0.018	0.114	0.000	0.000	0.000	0.132
A-LAV1 36 cm	0.015	0.091	0.000	0.024	0.005	0.098	0.127	0.015	0.105	0.019	0.008	0.003	0.149
A-LAV1 42 cm	0.022	0.081	0.000	0.005	0.003	0.038	0.046	0.005	0.131	0.000	0.000	0.013	0.149
A-LAV1 48 cm	0.010	0.087	0.000	0.007	0.000	0.027	0.034	0.017	0.094	0.005	0.011	0.007	0.135
A-LAV1 54 cm	0.005	0.085	0.000	0.000	0.000	0.018	0.018	0.028	0.121	0.019	0.014	0.018	0.200
A-LAV1 60 cm	0.012	0.086	0.000	0.002	0.000	0.037	0.039	0.043	0.076	0.009	0.007	0.010	0.146
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
A-LAV1 6 cm	0.010	0.043	0.054	0.071	0.038	0.013	0.122	0.448	0.000	0.294	2.152		
A-LAV1 12 cm	0.011	0.186	0.196	0.034	0.058	0.012	0.104	0.531	0.000	0.426	1.198		
A-LAV1 18 cm	0.018	0.084	0.102	0.016	0.005	0.044	0.065	0.315	0.000	0.258	0.766		
A-LAV1 24 cm	0.017	0.086	0.103	0.008	0.000	0.001	0.010	0.159	0.000	0.307	0.379		
A-LAV1 30 cm	0.032	0.063	0.095	0.019	0.010	0.008	0.037	0.082	0.000	0.332	0.372		
A-LAV1 36 cm	0.009	0.070	0.079	0.009	0.000	0.014	0.023	0.098	0.000	0.319	0.263		
A-LAV1 42 cm	0.031	0.124	0.155	0.024	0.000	0.002	0.026	0.065	0.000	0.385	0.159		
A-LAV1 48 cm	0.013	0.065	0.078	0.014	0.000	0.006	0.020	0.040	0.013	0.300	0.105		
A-LAV1 54 cm	0.017	0.102	0.119	0.008	0.000	0.002	0.010	0.021	0.013	0.403	0.054		
A-LAV1 60 cm	0.004	0.066	0.069	0.007	0.000	0.000	0.007	0.083	0.000	0.301	0.142		

Annexe 29 : Palynofacies quantitatifs, profil AlAVI.
 % massique des différentes particules observées (blanc) ;
 % massiques des sommes des particules LC, LCO DG et éléments figurés,
 et % massique de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAR	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
06 LA A 0 cm	0.011	0.123	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.098	0.012	0.049	0.035	0.250
06 LA A 5 cm	0.000	0.145	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.061	0.122	0.053	0.040	0.020	0.296
06 LA A 10 cm	0.005	0.162	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049	0.117	0.039	0.038	0.021	0.264
06 LA A 15 cm	0.011	0.155	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.051	0.120	0.023	0.031	0.031	0.248
06 LA A 20 cm	0.000	0.151	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.067	0.114	0.008	0.018	0.006	0.213
06 LA A 25 cm	0.000	0.153	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.053	0.139	0.024	0.041	0.010	0.268
06 LA A 30 cm	0.012	0.192	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.063	0.149	0.027	0.022	0.020	0.280
06 LA A 35 cm	0.000	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035	0.088	0.028	0.018	0.008	0.177
06 LA A 40 cm	0.000	0.144	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043	0.112	0.012	0.020	0.016	0.203
06 LA A 45 cm	0.000	0.109	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.037	0.096	0.016	0.027	0.016	0.191
06 LA A 50 cm	0.000	0.116	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035	0.093	0.014	0.024	0.016	0.184
06 LA A 55 cm	0.000	0.168	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.037	0.090	0.014	0.016	0.019	0.176
06 LA A 60 cm	0.000	0.153	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.108	0.025	0.018	0.011	0.198
06 LA A 65 cm	0.000	0.146	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.050	0.097	0.033	0.037	0.021	0.237
06 LA A 70 cm	0.000	0.143	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.096	0.028	0.045	0.016	0.221
Echantillons	MOAgc	MOAR	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCO al	LCO tr	LCO c	LCO conc	LCO r	LCO
LA A R 0 cm	0.000	0.182	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.070	0.155	0.039	0.023	0.006	0.294
LA A R 10 cm	0.000	0.169	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018	0.162	0.016	0.011	0.025	0.232
LA A R 20 cm	0.000	0.118	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.104	0.091	0.023	0.013	0.023	0.255
LA A R 25 cm	0.000	0.139	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.072	0.178	0.031	0.027	0.000	0.308
LA A R 30 cm	0.000	0.188	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045	0.142	0.039	0.000	0.004	0.231
LA A R 35 cm	0.000	0.124	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.110	0.096	0.024	0.014	0.025	0.269
LA A R 40 cm	0.000	0.186	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.039	0.142	0.038	0.009	0.011	0.238
LA A R 45 cm	0.004	0.188	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045	0.125	0.014	0.042	0.000	0.226
LA A R 50 cm	0.000	0.166	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043	0.154	0.006	0.010	0.017	0.231
LA A R 55 cm	0.000	0.160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.062	0.166	0.016	0.000	0.004	0.248
LA A R 60 cm	0.000	0.162	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.048	0.161	0.006	0.000	0.000	0.215
LA A R 65 cm	0.000	0.135	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.076	0.154	0.008	0.000	0.000	0.238
LA A R 70 cm	0.000	0.149	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027	0.220	0.048	0.000	0.015	0.310
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
06 LA A 0 cm	0.015	0.046	0.061	0.001	0.000	0.010	0.011	0.000	0.044	0.435	0.022		
06 LA A 5 cm	0.013	0.099	0.112	0.000	0.000	0.003	0.003	0.000	0.080	0.554	0.003		
06 LA A 10 cm	0.025	0.083	0.108	0.000	0.000	0.009	0.009	0.000	0.045	0.535	0.014		
06 LA A 15 cm	0.025	0.088	0.113	0.000	0.000	0.007	0.007	0.000	0.073	0.517	0.018		
06 LA A 20 cm	0.014	0.084	0.098	0.000	0.000	0.009	0.009	0.000	0.034	0.463	0.009		
06 LA A 25 cm	0.017	0.087	0.104	0.000	0.000	0.006	0.006	0.000	0.127	0.524	0.006		
06 LA A 30 cm	0.023	0.081	0.105	0.000	0.000	0.004	0.004	0.000	0.120	0.576	0.016		
06 LA A 35 cm	0.017	0.066	0.083	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.063	0.369	0.001		
06 LA A 40 cm	0.017	0.085	0.103	0.000	0.000	0.007	0.007	0.000	0.162	0.449	0.007		
06 LA A 45 cm	0.020	0.071	0.091	0.000	0.000	0.004	0.004	0.000	0.136	0.391	0.004		
06 LA A 50 cm	0.009	0.076	0.085	0.000	0.000	0.003	0.003	0.000	0.149	0.385	0.003		
06 LA A 55 cm	0.019	0.073	0.091	0.000	0.000	0.004	0.004	0.000	0.222	0.435	0.004		
06 LA A 60 cm	0.016	0.097	0.113	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.268	0.464	0.001		
06 LA A 65 cm	0.014	0.096	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.153	0.493	0.001		
06 LA A 70 cm	0.016	0.092	0.107	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.207	0.471	0.000		
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
LA A R 0 cm	0.006	0.062	0.067	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.543	0.002		
LA A R 10 cm	0.013	0.045	0.058	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032	0.459	0.000		
LA A R 20 cm	0.006	0.072	0.078	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.450	0.000		
LA A R 25 cm	0.002	0.089	0.091	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.538	0.000		
LA A R 30 cm	0.004	0.073	0.077	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.087	0.495	0.000		
LA A R 35 cm	0.007	0.076	0.082	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.476	0.000		
LA A R 40 cm	0.004	0.055	0.058	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.051	0.482	0.000		
LA A R 45 cm	0.005	0.067	0.072	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035	0.486	0.004		
LA A R 50 cm	0.004	0.067	0.071	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.488	0.000		
LA A R 55 cm	0.000	0.086	0.086	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030	0.494	0.000		
LA A R 60 cm	0.000	0.058	0.058	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.077	0.435	0.000		
LA A R 65 cm	0.003	0.074	0.077	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.450	0.000		
LA A R 70 cm	0.003	0.118	0.122	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.048	0.581	0.000		

Annexe 30 : Résultats des palynofacies quantitatifs, profils 06LA A et LA A R.
 % massiques des différentes particules observées (blanc) ;
 % massiques des sommes des particules LC, LCO DG et éléments figurés,
 et % massiques de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommelCO
06 LA S2 A	0.038	0.132	0.000	0.298	0.083	0.162	0.543	0.004	0.109	0.037	0.010	0.003	0.163
06 LA S2 20 cm PL	0.000	0.269	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.040	0.132	0.023	0.028	0.029	0.252
06 LA S2 25 cm PL	0.000	0.179	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.033	0.088	0.022	0.057	0.013	0.212
06 LA S2 30 cm PL	0.000	0.198	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.106	0.012	0.041	0.009	0.189
06 LA S2 35 cm PL	0.011	0.181	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.038	0.100	0.026	0.027	0.017	0.207
06 LA S2 40 cm PL	0.000	0.197	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.104	0.026	0.062	0.013	0.241
06 LA S2 45 cm PL	0.000	0.172	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.034	0.114	0.028	0.060	0.018	0.253
06 LA S2 50 cm PL	0.000	0.212	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.066	0.154	0.039	0.052	0.023	0.334
06 LA S2 55 cm PL	0.000	0.155	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027	0.100	0.018	0.067	0.020	0.233
06 LA S2 60 cm PL	0.000	0.221	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.059	0.154	0.034	0.024	0.034	0.306
06 LA S2 65 cm PL	0.000	0.196	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.050	0.123	0.032	0.053	0.025	0.283
06 LA S2 70 cm PL	0.000	0.152	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.090	0.027	0.034	0.020	0.188
06 LA S2 75 cm PL	0.000	0.197	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.044	0.130	0.031	0.042	0.027	0.274
06 LA S2 80 cm PL	0.000	0.243	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.055	0.143	0.040	0.024	0.013	0.275
06 LA S2 85 cm PL	0.000	0.163	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027	0.136	0.008	0.070	0.027	0.269
06 LA S2 90 cm PL	0.000	0.163	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.039	0.135	0.021	0.052	0.017	0.264
06 LA S2 95 cm PL	0.000	0.179	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.075	0.151	0.010	0.047	0.009	0.291
06 LA S2 100 cm PL	0.000	0.232	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.066	0.166	0.015	0.068	0.018	0.334
06 LA S2 110 cm PL	0.000	0.231	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.072	0.218	0.006	0.054	0.000	0.350
06 LA S2 115 cm PL	0.000	0.317	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.059	0.220	0.059	0.132	0.041	0.512
06 LA S2 120cm PL	0.000	0.256	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.179	0.013	0.038	0.023	0.289
06 LA S2 125 cm PL	0.000	0.161	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.046	0.128	0.003	0.026	0.021	0.225
06 LA S2 135 cm PL	0.000	0.201	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032	0.129	0.007	0.031	0.034	0.233
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
06 LA S2 A	0.006	0.065	0.070	0.049	0.000	0.012	0.061	0.664	0.000	0.365	1.306		
06 LA S2 20 cm PL	0.017	0.117	0.134	0.000	0.003	0.013	0.016	0.000	0.018	0.655	0.016		
06 LA S2 25 cm PL	0.023	0.069	0.092	0.000	0.002	0.008	0.010	0.000	0.018	0.483	0.010		
06 LA S2 30 cm PL	0.019	0.086	0.105	0.000	0.000	0.007	0.007	0.000	0.011	0.491	0.007		
06 LA S2 35 cm PL	0.021	0.082	0.103	0.000	0.000	0.014	0.014	0.000	0.061	0.491	0.026		
06 LA S2 40 cm PL	0.020	0.089	0.109	0.000	0.000	0.014	0.014	0.000	0.078	0.547	0.014		
06 LA S2 45 cm PL	0.023	0.081	0.104	0.000	0.000	0.009	0.009	0.000	0.033	0.528	0.009		
06 LA S2 50 cm PL	0.018	0.099	0.117	0.000	0.000	0.014	0.014	0.000	0.138	0.663	0.014		
06 LA S2 55 cm PL	0.010	0.070	0.080	0.000	0.000	0.013	0.013	0.000	0.036	0.468	0.013		
06 LA S2 60 cm PL	0.022	0.103	0.125	0.000	0.000	0.012	0.012	0.000	0.112	0.653	0.012		
06 LA S2 65 cm PL	0.014	0.084	0.098	0.000	0.000	0.016	0.016	0.000	0.015	0.577	0.016		
06 LA S2 70 cm PL	0.017	0.091	0.108	0.000	0.000	0.012	0.012	0.000	0.059	0.448	0.012		
06 LA S2 75 cm PL	0.016	0.110	0.127	0.000	0.000	0.008	0.008	0.000	0.072	0.597	0.008		
06 LA S2 80 cm PL	0.016	0.087	0.103	0.000	0.000	0.009	0.009	0.000	0.112	0.621	0.009		
06 LA S2 85 cm PL	0.013	0.079	0.092	0.000	0.000	0.011	0.011	0.014	0.149	0.610	0.025		
06 LA S2 90 cm PL	0.013	0.093	0.106	0.000	0.000	0.008	0.008	0.000	0.010	0.534	0.008		
06 LA S2 95 cm PL	0.028	0.119	0.147	0.000	0.000	0.030	0.030	0.000	0.049	0.618	0.030		
06 LA S2 100 cm PL	0.032	0.141	0.174	0.000	0.000	0.007	0.007	0.000	0.072	0.740	0.007		
06 LA S2 110 cm PL	0.077	0.171	0.248	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.829	0.001		
06 LA S2 115 cm PL	0.023	0.138	0.162	0.000	0.000	0.007	0.007	0.000	0.155	0.990	0.007		
06 LA S2 120cm PL	0.015	0.081	0.096	0.000	0.000	0.005	0.005	0.000	0.214	0.641	0.005		
06 LA S2 125 cm PL	0.015	0.120	0.134	0.000	0.000	0.012	0.012	0.000	0.187	0.520	0.012		
06 LA S2 135 cm PL	0.009	0.103	0.112	0.000	0.000	0.003	0.003	0.000	0.219	0.545	0.003		

Annexe 31 : Résultats des palynofacies quantitatifs, profil 06LA S2 échantillons PL.
 % massiques des différentes particules observées (blanc) ;
 % massiques des sommes des particules LC, LCO DG et éléments figurés,
 et % massiques de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAR	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOail	LCOt	LCOc	LCOconco	LCOre	sommeLCO
06 LA S2 20 cm TF	0.084	0.156	0.000	0.000	0.011	0.343	0.355	0.007	0.153	0.000	0.015	0.006	0.182
06 LA S2 25 cm TF	0.052	0.106	0.000	0.009	0.009	0.206	0.275	0.029	0.104	0.009	0.007	0.015	0.164
06 LA S2 30 cm TF	0.075	0.091	0.000	0.021	0.042	0.150	0.214	0.034	0.139	0.014	0.008	0.018	0.213
06 LA S2 35 cm TF	0.027	0.105	0.000	0.139	0.076	0.284	0.499	0.017	0.114	0.003	0.000	0.014	0.147
06 LA S2 40 cm TF	0.076	0.213	0.000	0.030	0.021	0.091	0.142	0.048	0.175	0.008	0.008	0.014	0.253
06 LA S2 45 cm TF	0.095	0.212	0.000	0.010	0.071	0.146	0.228	0.093	0.206	0.023	0.012	0.006	0.341
06 LA S2 50 cm TF	0.033	0.187	0.000	0.060	0.012	0.123	0.195	0.045	0.179	0.007	0.019	0.013	0.263
06 LA S2 55 cm TF	0.032	0.207	0.000	0.036	0.005	0.037	0.078	0.012	0.144	0.018	0.027	0.012	0.213
06 LA S2 60 cm TF	0.008	0.228	0.000	0.000	0.007	0.157	0.165	0.026	0.181	0.028	0.028	0.032	0.296
06 LA S2 65 cm TF	0.003	0.194	0.000	0.000	0.019	0.051	0.070	0.033	0.171	0.032	0.020	0.024	0.281
06 LA S2 70 cm TF	0.019	0.142	0.000	0.000	0.016	0.054	0.070	0.076	0.176	0.019	0.004	0.031	0.307
06 LA S2 75 cm TF	0.010	0.232	0.000	0.011	0.000	0.029	0.040	0.048	0.203	0.019	0.024	0.084	0.379
06 LA S2 80 cm TF	0.023	0.199	0.000	0.006	0.005	0.060	0.071	0.048	0.242	0.025	0.023	0.000	0.338
06 LA S2 85 cm TF	0.000	0.144	0.000	0.000	0.001	0.065	0.067	0.051	0.173	0.024	0.025	0.000	0.274
06 LA S2 90 cm TF	0.002	0.222	0.000	0.009	0.007	0.063	0.079	0.028	0.208	0.013	0.036	0.000	0.285
06 LA S2 95 cm TF	0.028	0.168	0.000	0.045	0.003	0.042	0.091	0.053	0.200	0.073	0.037	0.000	0.363
06 LA S2 100 cm TF	0.015	0.192	0.000	0.009	0.000	0.024	0.033	0.028	0.211	0.043	0.022	0.024	0.328
06 LA S2 110 cm TF	0.007	0.314	0.000	0.045	0.005	0.010	0.060	0.059	0.342	0.028	0.046	0.025	0.500
06 LA S2 115 cm TF	0.011	0.132	0.000	0.031	0.002	0.007	0.040	0.056	0.165	0.034	0.029	0.000	0.284
06 LA S2 120cm TF	0.000	0.229	0.000	0.029	0.000	0.019	0.047	0.094	0.266	0.030	0.005	0.000	0.395
06 LA S2 125 cm TF	0.000	0.171	0.000	0.004	0.000	0.006	0.010	0.053	0.182	0.037	0.018	0.010	0.299
06 LA S2 135 cm TF	0.007	0.149	0.000	0.013	0.000	0.004	0.018	0.047	0.194	0.017	0.015	0.008	0.281
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
06 LA S2 20 cm TF	0.007	0.050	0.056	0.101	0.010	0.000	0.111	0.149	0.032	0.384	0.698		
06 LA S2 25 cm TF	0.004	0.056	0.060	0.090	0.024	0.014	0.129	0.422	0.000	0.330	0.877		
06 LA S2 30 cm TF	0.004	0.053	0.058	0.058	0.026	0.001	0.086	0.370	0.000	0.361	0.745		
06 LA S2 35 cm TF	0.000	0.044	0.044	0.037	0.010	0.000	0.107	0.120	0.000	0.296	0.752		
06 LA S2 40 cm TF	0.000	0.059	0.059	0.100	0.035	0.000	0.135	0.195	0.000	0.525	0.547		
06 LA S2 45 cm TF	0.000	0.071	0.071	0.055	0.034	0.090	0.179	0.140	0.000	0.624	0.642		
06 LA S2 50 cm TF	0.005	0.049	0.054	0.072	0.028	0.000	0.100	0.122	0.000	0.504	0.450		
06 LA S2 55 cm TF	0.025	0.083	0.108	0.026	0.012	0.000	0.038	0.036	0.005	0.527	0.184		
06 LA S2 60 cm TF	0.004	0.093	0.097	0.009	0.114	0.007	0.131	0.028	0.023	0.621	0.332		
06 LA S2 65 cm TF	0.007	0.049	0.056	0.000	0.003	0.002	0.006	0.112	0.000	0.530	0.190		
06 LA S2 70 cm TF	0.004	0.083	0.087	0.006	0.005	0.006	0.018	0.025	0.021	0.535	0.132		
06 LA S2 75 cm TF	0.004	0.086	0.090	0.024	0.038	0.000	0.062	0.076	0.000	0.700	0.189		
06 LA S2 80 cm TF	0.008	0.086	0.093	0.010	0.002	0.000	0.012	0.062	0.000	0.630	0.167		
06 LA S2 85 cm TF	0.001	0.052	0.053	0.032	0.006	0.000	0.038	0.028	0.008	0.472	0.133		
06 LA S2 90 cm TF	0.010	0.101	0.111	0.014	0.007	0.025	0.047	0.026	0.000	0.618	0.153		
06 LA S2 95 cm TF	0.019	0.112	0.132	0.017	0.007	0.019	0.043	0.058	0.019	0.663	0.221		
06 LA S2 100 cm TF	0.019	0.129	0.149	0.006	0.000	0.000	0.006	0.019	0.013	0.669	0.073		
06 LA S2 110 cm TF	0.017	0.166	0.184	0.014	0.018	0.038	0.069	0.094	0.016	0.998	0.229		
06 LA S2 115 cm TF	0.005	0.087	0.092	0.009	0.014	0.008	0.031	0.055	0.022	0.507	0.136		
06 LA S2 120cm TF	0.018	0.134	0.153	0.000	0.008	0.003	0.011	0.093	0.015	0.777	0.151		
06 LA S2 125 cm TF	0.010	0.086	0.097	0.008	0.002	0.004	0.014	0.019	0.000	0.567	0.043		
06 LA S2 135 cm TF	0.007	0.098	0.105	0.000	0.000	0.001	0.001	0.018	0.000	0.535	0.043		

Annexe 32 : Résultats des palynofacies quantitatifs, profil 06LA S2 échantillons TF.
 % massiques des différentes particules observées (blanc) ;
 % massiques des sommes des particules LC, LCO DG et éléments figurés,
 et % massiques de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
Laval MES 12/07/2006a	0.030	0.217	0.000	0.006	0.005	0.000	0.011	0.018	0.184	0.015	0.004	0.001	0.221
Laval MES 08/09/2006	0.000	0.250	0.000	0.000	0.004	0.000	0.004	0.048	0.265	0.015	0.024	0.033	0.385
Laval MES 25/09/2006	0.003	0.297	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.273	0.019	0.046	0.050	0.403
Laval MES 20/10/2006a	0.003	0.210	0.000	0.019	0.000	0.008	0.027	0.023	0.191	0.016	0.003	0.003	0.237
Laval MES 07/12/2006a	0.000	0.295	0.000	0.004	0.031	0.037	0.071	0.038	0.227	0.022	0.000	0.037	0.325
Laval MES 05/06/2007a	0.000	0.214	0.000	0.000	0.018	0.000	0.018	0.030	0.160	0.018	0.030	0.015	0.254
Laval MES 22/11/2007	0.000	0.195	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.216	0.059	0.000	0.027	0.312
Laval MES 11/01/2008a	0.000	0.239	0.000	0.000	0.038	0.000	0.038	0.034	0.235	0.029	0.000	0.017	0.314
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	prrite	MOF %	MOR %		
Laval MES 12/07/2006a	0.004	0.057	0.061	0.005	0.003	0.003	0.012	0.043	0.135	0.499	0.096		
Laval MES 08/09/2006	0.000	0.056	0.056	0.005	0.000	0.000	0.005	0.077	0.098	0.691	0.085		
Laval MES 25/09/2006	0.009	0.052	0.061	0.004	0.000	0.000	0.004	0.046	0.132	0.761	0.053		
Laval MES 20/10/2006a	0.006	0.064	0.070	0.012	0.000	0.009	0.021	0.048	0.033	0.516	0.099		
Laval MES 07/12/2006a	0.000	0.051	0.051	0.005	0.000	0.003	0.008	0.045	0.235	0.670	0.125		
Laval MES 05/06/2007a	0.004	0.043	0.047	0.014	0.004	0.000	0.018	0.042	0.328	0.516	0.078		
Laval MES 22/11/2007	0.006	0.052	0.058	0.021	0.007	0.000	0.028	0.042	0.288	0.585	0.070		
Laval MES 11/01/2008a	0.002	0.040	0.042	0.000	0.000	0.004	0.004	0.038	0.184	0.595	0.080		

Annexe 33 : Résultats des palynofacies quantitatifs, MES du Laval
% massiques des différentes particules observées (blanc) ;
% massiques des sommes des particules LC, LCO DG et éléments figurés,
et % massiques de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
06 BRU S1 A 0 cm	0.201	0.140	0.032	0.025	0.499	0.005	0.530	0.052	0.219	0.008	0.000	0.146	0.426
06 BRU S1 A 5 cm	0.140	0.147	0.020	0.000	0.246	0.005	0.251	0.010	0.142	0.007	0.000	0.014	0.173
06 BRU S1 A 10 cm	0.069	0.218	0.013	0.011	0.094	0.007	0.113	0.011	0.163	0.064	0.009	0.062	0.310
06 BRU S1 A 15 cm	0.041	0.087	0.041	0.000	0.021	0.000	0.021	0.023	0.142	0.068	0.003	0.066	0.302
06 BRU S1 PL 20 cm	0.000	0.191	0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.082	0.128	0.036	0.018	0.028	0.292
06 BRU S1 PL 25 cm	0.008	0.182	0.029	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.129	0.010	0.000	0.093	0.243
06 BRU S1 PL 30 cm	0.008	0.212	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.186	0.022	0.011	0.117	0.352
06 BRU S1 PL 35 cm	0.000	0.207	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.151	0.032	0.013	0.082	0.295
06 BRU S1 PL 40 cm	0.000	0.218	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027	0.166	0.000	0.000	0.064	0.256
06 BRU S1 PL 45 cm	0.000	0.241	0.477	0.000	0.000	0.000	0.000	0.081	0.190	0.087	0.027	0.000	0.386
06 BRU S1 PL 50 cm	0.000	0.178	0.599	0.000	0.000	0.000	0.000	0.069	0.158	0.060	0.036	0.000	0.323
06 BRU S1 PL 55 cm	0.000	0.193	0.406	0.000	0.000	0.000	0.000	0.102	0.143	0.025	0.000	0.000	0.270
06 BRU S1 PL 60 cm	0.006	0.358	0.315	0.000	0.000	0.000	0.000	0.102	0.120	0.059	0.007	0.000	0.289
06 BRU S1 PL 65 cm	0.011	0.357	0.277	0.000	0.000	0.000	0.000	0.092	0.179	0.014	0.043	0.037	0.366
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
06 BRU S1 TF 20 cm	0.029	0.128	0.052	0.000	0.042	0.000	0.042	0.048	0.194	0.025	0.000	0.000	0.267
06 BRU S1 TF 25 cm	0.032	0.144	0.059	0.000	0.036	0.000	0.036	0.032	0.213	0.026	0.000	0.000	0.271
06 BRU S1 TF 35 cm	0.030	0.156	0.053	0.000	0.038	0.000	0.038	0.064	0.227	0.022	0.000	0.000	0.312
06 BRU S1 TF 40 cm	0.033	0.217	0.080	0.000	0.029	0.000	0.029	0.078	0.142	0.049	0.014	0.000	0.282
06 BRU S1 TF 50 cm	0.025	0.168	0.485	0.000	0.047	0.000	0.047	0.078	0.140	0.077	0.056	0.000	0.349
06 BRU S1 TF 65 cm	0.008	0.233	0.297	0.012	0.049	0.000	0.061	0.086	0.172	0.102	0.005	0.000	0.365
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
06 BRU S1 A 0 cm	0.000	0.033	0.033	0.339	0.009	0.054	0.402	1.308	0.052	0.631	2.442		
06 BRU S1 A 5 cm	0.000	0.016	0.016	0.122	0.021	0.000	0.143	1.685	0.021	0.356	2.219		
06 BRU S1 A 10 cm	0.002	0.029	0.032	0.119	0.031	0.129	0.279	0.239	0.000	0.573	0.700		
06 BRU S1 A 15 cm	0.004	0.042	0.046	0.029	0.021	0.000	0.050	0.000	0.038	0.476	0.111		
06 BRU S1 PL 20 cm	0.009	0.073	0.082	0.000	0.008	0.000	0.008	0.000	0.029	0.589	0.008		
06 BRU S1 PL 25 cm	0.016	0.084	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.554	0.008		
06 BRU S1 PL 30 cm	0.011	0.063	0.075	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.095	0.651	0.008		
06 BRU S1 PL 35 cm	0.004	0.058	0.062	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.041	0.584	0.000		
06 BRU S1 PL 40 cm	0.005	0.095	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.053	0.601	0.000		
06 BRU S1 PL 45 cm	0.000	0.006	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.105	1.111	0.000		
06 BRU S1 PL 50 cm	0.000	0.004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.079	1.104	0.000		
06 BRU S1 PL 55 cm	0.000	0.006	0.006	0.000	0.055	0.000	0.055	0.000	0.076	0.875	0.055		
06 BRU S1 PL 60 cm	0.001	0.007	0.008	0.000	0.019	0.000	0.019	0.000	0.269	0.970	0.025		
06 BRU S1 PL 65 cm	0.005	0.002	0.007	0.000	0.095	0.000	0.095	0.000	0.050	1.007	0.106		
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
06 BRU S1 TF 20 cm	0.000	0.026	0.026	0.028	0.024	0.000	0.052	0.161	0.008	0.473	0.284		
06 BRU S1 TF 25 cm	0.000	0.033	0.033	0.021	0.031	0.000	0.052	0.170	0.015	0.507	0.290		
06 BRU S1 TF 35 cm	0.005	0.031	0.036	0.039	0.007	0.000	0.046	0.202	0.016	0.557	0.317		
06 BRU S1 TF 40 cm	0.003	0.036	0.039	0.018	0.012	0.000	0.030	0.090	0.039	0.618	0.182		
06 BRU S1 TF 50 cm	0.000	0.007	0.007	0.062	0.019	0.000	0.081	0.107	0.059	1.010	0.259		
06 BRU S1 TF 65 cm	0.000	0.012	0.012	0.007	0.044	0.000	0.051	0.051	0.163	0.907	0.180		

Annexe 34 : Résultats des palynofacies quantitatifs, profil 06-BRU S1.
 % massiques des différentes particules observées (blanc) ;
 % massiques des sommes des particules LC, LCO DG et éléments figurés,
 et % massiques de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOT	LCOc	LCOconco	LCO re	somme LCO
BRU S1 Lat surface	0.000	0.420	0.402	0.000	0.000	0.000	0.000	0.096	0.333	0.057	0.042	0.000	0.528
BRU S1 Lat 10	0.000	0.479	0.459	0.000	0.000	0.000	0.000	0.100	0.198	0.012	0.019	0.059	0.387
BRU S1 Lat 30	0.000	0.378	0.480	0.000	0.000	0.000	0.000	0.080	0.097	0.052	0.026	0.000	0.254
BRU S1 Lat 40	0.000	0.499	0.387	0.000	0.000	0.000	0.000	0.078	0.137	0.000	0.013	0.000	0.227
BRU S1 Lat 50	0.000	0.395	0.379	0.000	0.000	0.000	0.000	0.080	0.113	0.023	0.046	0.000	0.261
BRU S1 Lat 60	0.000	0.655	0.428	0.000	0.000	0.000	0.000	0.088	0.232	0.058	0.019	0.000	0.397
BRU S1 Lat	0.000	0.235	0.534	0.000	0.000	0.000	0.000	0.100	0.122	0.057	0.012	0.000	0.291
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
BRU S1 Lat surface	0.000	0.021	0.021	0.000	0.030	0.000	0.030	0.000	0.035	1.371	0.030		
BRU S1 Lat	0.000	0.007	0.007	0.000	0.020	0.000	0.020	0.000	0.101	1.332	0.020		
BRU S1 Lat	0.000	0.009	0.009	0.000	0.006	0.000	0.006	0.000	0.041	1.122	0.006		
BRU S1 Lat	0.000	0.017	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	1.130	0.000		
BRU S1 Lat	0.000	0.004	0.004	0.000	0.013	0.000	0.013	0.000	0.095	1.040	0.013		
BRU S1 Lat	0.000	0.012	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.081	1.491	0.000		
BRU S1 Lat	0.000	0.003	0.003	0.000	0.068	0.000	0.068	0.000	0.135	1.062	0.068		

Annexe 35 : Résultats des palynofacies quantitatifs, profil BRU S1Lat.
 % massiques des différentes particules observées (blanc) ;
 % massiques des sommes des particules LC, LCO DG et éléments figurés,
 et % massiques de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	somme LCO
06 BRU S3 PL 0 cm	0.000	0.276	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049	0.191	0.030	0.016	0.008	0.295
06 BRU S3 PL 5 cm	0.000	0.228	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.036	0.231	0.000	0.041	0.000	0.307
06 BRU S3 PL 10 cm	0.000	0.223	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.088	0.212	0.007	0.000	0.005	0.312
06 BRU S3 PL 15 cm	0.000	0.236	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043	0.268	0.009	0.000	0.000	0.319
06 BRU S3 PL 20 cm	0.000	0.180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.041	0.234	0.053	0.012	0.018	0.359
06 BRU S3 PL 25 cm	0.000	0.211	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.059	0.243	0.000	0.019	0.000	0.321
06 BRU S3 PL 30 cm	0.000	0.270	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.110	0.246	0.007	0.010	0.014	0.387
06 BRU S3 PL 45 cm	0.000	0.182	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.066	0.229	0.011	0.022	0.016	0.344
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	somme LCO
06 BRU S3 TF 0 cm	0.047	0.287	0.000	0.000	0.263	0.049	0.312	0.000	0.249	0.016	0.000	0.015	0.280
06 BRU S3 TF 5 cm	0.077	0.304	0.000	0.000	0.000	0.072	0.072	0.052	0.238	0.017	0.000	0.019	0.326
06 BRU S3 TF 10 cm	0.000	0.219	0.000	0.000	0.150	0.087	0.238	0.047	0.213	0.035	0.018	0.010	0.323
06 BRU S3 TF 15 cm	0.058	0.211	0.000	0.000	0.241	0.168	0.409	0.045	0.234	0.002	0.009	0.007	0.297
06 BRU S3 TF 20 cm	0.036	0.201	0.000	0.000	0.158	0.028	0.186	0.069	0.208	0.013	0.042	0.012	0.345
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	somme LCO
BRU S3 Lat A 0 cm	0.000	0.161	0.000	0.312	1.425	0.209	1.946	0.018	0.116	0.000	0.009	0.038	0.181
BRU S3 Lat A 5 cm	0.050	0.137	0.000	0.000	0.048	0.120	0.168	0.030	0.202	0.000	0.000	0.000	0.232
BRU S3 Lat PL 10 cm	0.000	0.318	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.066	0.124	0.008	0.012	0.017	0.228
BRU S3 Lat PL 20 cm	0.000	0.280	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.023	0.143	0.009	0.026	0.010	0.211
BRU S3 Lat PL 30 cm	0.000	0.238	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.050	0.175	0.061	0.000	0.023	0.310
BRU S3 Lat PL 40 cm	0.000	0.220	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032	0.183	0.007	0.000	0.013	0.235
BRU S3 Lat PL 50 cm	0.000	0.165	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.071	0.207	0.017	0.009	0.018	0.322
BRU S3 Lat PL 60 cm	0.000	0.151	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.023	0.230	0.045	0.017	0.006	0.320
BRU S3 Lat PL 700 cm	0.000	0.179	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027	0.241	0.025	0.010	0.015	0.318
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
06 BRU S3 PL 0 cm	0.000	0.042	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.612	0.000	0.000		
06 BRU S3 PL 5 cm	0.000	0.039	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.026	0.574	0.000		
06 BRU S3 PL 10 cm	0.000	0.026	0.026	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049	0.560	0.000		
06 BRU S3 PL 15 cm	0.000	0.045	0.045	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.051	0.599	0.000		
06 BRU S3 PL 20 cm	0.004	0.046	0.051	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049	0.590	0.000		
06 BRU S3 PL 25 cm	0.003	0.047	0.050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031	0.582	0.000		
06 BRU S3 PL 30 cm	0.000	0.050	0.050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.707	0.000		
06 BRU S3 PL 45 cm	0.003	0.047	0.050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.109	0.577	0.000		
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
06 BRU S3 TF 0 cm	0.000	0.014	0.014	0.099	0.000	0.049	0.149	0.367	0.018	0.581	0.875		
06 BRU S3 TF 5 cm	0.000	0.030	0.030	0.084	0.000	0.000	0.084	0.558	0.000	0.660	0.792		
06 BRU S3 TF 10 cm	0.004	0.019	0.023	0.053	0.000	0.000	0.053	0.741	0.015	0.565	1.032		
06 BRU S3 TF 15 cm	0.000	0.006	0.006	0.077	0.021	0.047	0.145	0.623	0.013	0.514	1.235		
06 BRU S3 TF 20 cm	0.000	0.016	0.016	0.056	0.014	0.000	0.071	0.383	0.057	0.561	0.677		
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
BRU S3 Lat A 0 cm	0.000	0.017	0.017	0.206	0.023	0.000	0.229	2.393	0.000	0.358	4.568		
BRU S3 Lat A 5 cm	0.000	0.032	0.032	0.078	0.000	0.000	0.078	0.334	0.078	0.401	0.630		
BRU S3 Lat PL 10 cm	0.000	0.024	0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.570	0.000		
BRU S3 Lat PL 20 cm	0.005	0.053	0.058	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.121	0.548	0.000		
BRU S3 Lat PL 30 cm	0.000	0.049	0.049	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018	0.597	0.000		
BRU S3 Lat PL 40 cm	0.000	0.017	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.065	0.472	0.000		
BRU S3 Lat PL 50 cm	0.000	0.027	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.198	0.514	0.000		
BRU S3 Lat PL 60 cm	0.000	0.083	0.083	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.031	0.555	0.000		
BRU S3 Lat PL 700 cm	0.000	0.029	0.029	0.000	0.000	0.005	0.005	0.000	0.117	0.526	0.005		

*Annexe 36 : Résultats des palynofacies quantitatifs,
 profils 06-BRU S3 (Pl et TF) et BRU S3Lat.
 % massiques des différentes particules observées (blanc) ;
 % massiques des sommes des particules LC, LCO DG et éléments figurés,
 et % massiques de la MOF et MOR (gris).*

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCot	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
Brusquet MES 12/07/2006b	0.000	0.181	0.069	0.014	0.009	0.020	0.043	0.121	0.264	0.034	0.015	0.027	0.461
Brusquet MES 24/09/2006	0.020	0.115	0.085	0.024	0.098	0.039	0.161	0.028	0.244	0.050	0.026	0.009	0.354
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCot	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
MES Moulin 08/09/2006a	0.000	0.224	0.000	0.000	0.020	0.009	0.029	0.034	0.193	0.034	0.040	0.015	0.316
MES Moulin 24/09/2006	0.009	0.208	0.000	0.004	0.007	0.042	0.054	0.063	0.124	0.026	0.027	0.009	0.249
MES Moulin 20/10/2006a	0.000	0.256	0.000	0.000	0.010	0.000	0.010	0.033	0.193	0.050	0.024	0.006	0.307
MES Moulin 07/12/2006	0.000	0.292	0.000	0.004	0.030	0.052	0.086	0.038	0.225	0.022	0.000	0.037	0.322
MES Moulin 05/06/2007a	0.000	0.172	0.000	0.000	0.004	0.024	0.028	0.054	0.151	0.055	0.015	0.015	0.291
MES Moulin 23/11/2007	0.005	0.195	0.000	0.003	0.004	0.000	0.007	0.041	0.160	0.028	0.006	0.012	0.247
MES Moulin 12/01/2008a	0.000	0.271	0.000	0.000	0.041	0.000	0.041	0.037	0.256	0.030	0.000	0.019	0.341
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
Brusquet MES 12/07/2006b	0.000	0.025	0.025	0.005	0.006	0.003	0.014	0.135	0.065	0.736	0.192		
Brusquet MES 24/09/2006	0.000	0.008	0.008	0.012	0.006	0.043	0.061	0.224	0.064	0.561	0.465		
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF %	MOR %		
MES Moulin 08/09/2006a	0.000	0.044	0.044	0.015	0.005	0.000	0.020	0.018	0.098	0.584	0.067		
MES Moulin 24/09/2006	0.000	0.040	0.040	0.000	0.003	0.002	0.005	0.024	0.110	0.497	0.092		
MES Moulin 20/10/2006a	0.002	0.059	0.061	0.013	0.000	0.000	0.013	0.019	0.205	0.624	0.042		
MES Moulin 07/12/2006	0.000	0.050	0.050	0.005	0.000	0.003	0.008	0.045	0.233	0.664	0.139		
MES Moulin 05/06/2007a	0.010	0.080	0.089	0.011	0.000	0.000	0.011	0.032	0.256	0.552	0.071		
MES Moulin 23/11/2007	0.000	0.059	0.059	0.004	0.000	0.000	0.004	0.058	0.049	0.501	0.074		
MES Moulin 12/01/2008a	0.002	0.044	0.046	0.000	0.000	0.004	0.004	0.042	0.200	0.658	0.087		

Annexe 37 : Résultats des palynofacies quantitatifs, MES du Brusquet et du Moulin.
 % massiques des différentes particules observées (blanc) ;
 % massiques des sommes des particules LC, LCO DG et éléments figurés,
 et % massiques de la MOF et MOR (gris).

Annexes 38 à 46: Palynofacies quantitatif normé aux teneurs en Al_2O_3

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
A-LAV1 6 cm	0.0125	0.0045	0.0000	0.0622	0.0282	0.0152	0.1056	0.0000	0.0093	0.0009	0.0012	0.0020	0.0134
A-LAV1 12 cm	0.0057	0.0051	0.0000	0.0159	0.0087	0.0075	0.0320	0.0015	0.0078	0.0001	0.0000	0.0009	0.0103
A-LAV1 18 cm	0.0061	0.0027	0.0000	0.0087	0.0002	0.0110	0.0199	0.0002	0.0070	0.0000	0.0006	0.0000	0.0078
A-LAV1 24 cm	0.0033	0.0044	0.0000	0.0003	0.0003	0.0112	0.0117	0.0004	0.0087	0.0000	0.0010	0.0000	0.0101
A-LAV1 30 cm	0.0051	0.0075	0.0000	0.0046	0.0006	0.0079	0.0131	0.0013	0.0082	0.0000	0.0000	0.0000	0.0095
A-LAV1 36 cm	0.0011	0.0066	0.0000	0.0018	0.0004	0.0071	0.0093	0.0011	0.0076	0.0014	0.0006	0.0002	0.0109
A-LAV1 42 cm	0.0016	0.0061	0.0000	0.0004	0.0002	0.0029	0.0035	0.0004	0.0099	0.0000	0.0000	0.0010	0.0113
A-LAV1 48 cm	0.0008	0.0067	0.0000	0.0006	0.0000	0.0021	0.0026	0.0013	0.0073	0.0004	0.0009	0.0005	0.0104
A-LAV1 54 cm	0.0004	0.0065	0.0000	0.0000	0.0000	0.0014	0.0014	0.0021	0.0092	0.0015	0.0010	0.0014	0.0152
A-LAV1 60 cm	0.0010	0.0066	0.0000	0.0002	0.0000	0.0028	0.0030	0.0033	0.0058	0.0007	0.0006	0.0008	0.0111
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
A-LAV1 6 cm	0.0008	0.0032	0.0040	0.0053	0.0029	0.0009	0.0091	0.0334	0.0000	0.0219	0.1606		
A-LAV1 12 cm	0.0007	0.0124	0.0131	0.0022	0.0039	0.0008	0.0069	0.0355	0.0000	0.0285	0.0801		
A-LAV1 18 cm	0.0012	0.0057	0.0069	0.0011	0.0003	0.0030	0.0044	0.0212	0.0000	0.0174	0.0516		
A-LAV1 24 cm	0.0012	0.0061	0.0073	0.0006	0.0000	0.0001	0.0007	0.0113	0.0000	0.0219	0.0270		
A-LAV1 30 cm	0.0023	0.0045	0.0068	0.0014	0.0007	0.0006	0.0027	0.0059	0.0000	0.0238	0.0267		
A-LAV1 36 cm	0.0007	0.0051	0.0058	0.0007	0.0000	0.0010	0.0017	0.0071	0.0000	0.0233	0.0192		
A-LAV1 42 cm	0.0024	0.0094	0.0117	0.0018	0.0000	0.0002	0.0020	0.0049	0.0000	0.0292	0.0121		
A-LAV1 48 cm	0.0010	0.0050	0.0060	0.0011	0.0000	0.0005	0.0015	0.0031	0.0010	0.0230	0.0080		
A-LAV1 54 cm	0.0013	0.0078	0.0091	0.0006	0.0000	0.0002	0.0008	0.0016	0.0010	0.0308	0.0041		
A-LAV1 60 cm	0.0003	0.0050	0.0053	0.0006	0.0000	0.0000	0.0006	0.0064	0.0000	0.0231	0.0109		

Annexe 38 : % massiques normés aux teneurs en Al_2O_3 ,
profil A-LAV1 A ;

% massiques normés des différentes particules observées (blanc) ;
% massiques normés des sommes des particules LC, LCO, DG et éléments figurés ;
et % massiques normés de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LGDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommelCO
06 LA A 0 cm	0.0007	0.0079	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0036	0.0063	0.0008	0.0032	0.0022	0.0160
06 LA A 5 cm	0.0000	0.0092	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0039	0.0078	0.0034	0.0026	0.0013	0.0189
06 LA A 10 cm	0.0003	0.0104	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0031	0.0075	0.0025	0.0025	0.0014	0.0169
06 LA A 15 cm	0.0007	0.0101	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0034	0.0078	0.0015	0.0015	0.0020	0.0162
06 LA A 20 cm	0.0000	0.0097	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0043	0.0073	0.0005	0.0012	0.0004	0.0136
06 LA A 25 cm	0.0000	0.0097	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0034	0.0088	0.0016	0.0026	0.0007	0.0170
06 LA A 30 cm	0.0008	0.0122	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0040	0.0095	0.0017	0.0014	0.0012	0.0178
06 LA A 35 cm	0.0000	0.0078	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0062	0.0020	0.0013	0.0006	0.0125
06 LA A 40 cm	0.0000	0.0098	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0029	0.0076	0.0008	0.0014	0.0011	0.0138
06 LA A 45 cm	0.0000	0.0071	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0062	0.0011	0.0017	0.0010	0.0125
06 LA A 50 cm	0.0000	0.0077	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0023	0.0062	0.0011	0.0016	0.0011	0.0123
06 LA A 55 cm	0.0000	0.0121	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0027	0.0065	0.0010	0.0011	0.0014	0.0126
06 LA A 60 cm	0.0000	0.0103	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0073	0.0017	0.0012	0.0008	0.0134
06 LA A 65 cm	0.0000	0.0113	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001	0.0038	0.0075	0.0025	0.0029	0.0016	0.0184
06 LA A 70 cm	0.0000	0.0116	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0029	0.0078	0.0023	0.0037	0.0013	0.0179
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LGDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommelCO
LA A R 0 cm	0.0000	0.0110	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0043	0.0094	0.0023	0.0014	0.0004	0.0178
LA A R 10 cm	0.0000	0.0102	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0098	0.0010	0.0007	0.0015	0.0140
LA A R 20 cm	0.0000	0.0070	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0062	0.0054	0.0014	0.0008	0.0014	0.0152
LA A R 25 cm	0.0000	0.0083	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0043	0.0106	0.0018	0.0016	0.0000	0.0184
LA A R 30 cm	0.0000	0.0114	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0027	0.0087	0.0024	0.0000	0.0003	0.0140
LA A R 35 cm	0.0000	0.0075	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0066	0.0085	0.0015	0.0008	0.0015	0.0162
LA A R 40 cm	0.0000	0.0118	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0025	0.0090	0.0024	0.0005	0.0007	0.0151
LA A R 45 cm	0.0003	0.0131	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0032	0.0087	0.0010	0.0029	0.0000	0.0157
LA A R 50 cm	0.0000	0.0125	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0033	0.0116	0.0005	0.0007	0.0013	0.0174
LA A R 55 cm	0.0000	0.0130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0050	0.0134	0.0013	0.0000	0.0003	0.0201
LA A R 60 cm	0.0000	0.0128	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0038	0.0127	0.0004	0.0000	0.0000	0.0170
LA A R 65 cm	0.0000	0.0083	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0047	0.0094	0.0005	0.0000	0.0000	0.0146
LA A R 70 cm	0.0000	0.0096	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0017	0.0141	0.0031	0.0000	0.0009	0.0199
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
06 LA A 0 cm	0.0010	0.0030	0.0039	0.0001	0.0000	0.0007	0.0007	0.0000	0.0028	0.0278	0.0014		
06 LA A 5 cm	0.0008	0.0063	0.0071	0.0000	0.0000	0.0002	0.0002	0.0000	0.0051	0.0353	0.0002		
06 LA A 10 cm	0.0016	0.0053	0.0069	0.0000	0.0000	0.0006	0.0006	0.0000	0.0029	0.0343	0.0009		
06 LA A 15 cm	0.0016	0.0058	0.0074	0.0000	0.0000	0.0004	0.0004	0.0000	0.0047	0.0337	0.0012		
06 LA A 20 cm	0.0009	0.0054	0.0063	0.0000	0.0000	0.0006	0.0006	0.0000	0.0022	0.0296	0.0006		
06 LA A 25 cm	0.0011	0.0055	0.0066	0.0000	0.0000	0.0004	0.0004	0.0000	0.0081	0.0334	0.0004		
06 LA A 30 cm	0.0015	0.0051	0.0066	0.0000	0.0000	0.0002	0.0002	0.0000	0.0076	0.0365	0.0010		
06 LA A 35 cm	0.0012	0.0046	0.0058	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0045	0.0281	0.0000		
06 LA A 40 cm	0.0012	0.0058	0.0070	0.0000	0.0000	0.0005	0.0005	0.0000	0.0110	0.0305	0.0005		
06 LA A 45 cm	0.0013	0.0046	0.0059	0.0000	0.0000	0.0002	0.0002	0.0000	0.0089	0.0255	0.0002		
06 LA A 50 cm	0.0006	0.0051	0.0057	0.0000	0.0000	0.0002	0.0002	0.0000	0.0100	0.0257	0.0002		
06 LA A 55 cm	0.0013	0.0052	0.0066	0.0000	0.0000	0.0003	0.0003	0.0000	0.0160	0.0313	0.0003		
06 LA A 60 cm	0.0011	0.0066	0.0076	0.0001	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0181	0.0313	0.0001		
06 LA A 65 cm	0.0011	0.0074	0.0085	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0118	0.0381	0.0001		
06 LA A 70 cm	0.0013	0.0075	0.0087	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0168	0.0382	0.0000		
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
LA A R 0 cm	0.0003	0.0037	0.0041	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0328	0.0001		
LA A R 10 cm	0.0008	0.0027	0.0035	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0019	0.0278	0.0000		
LA A R 20 cm	0.0004	0.0043	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0288	0.0000		
LA A R 25 cm	0.0001	0.0053	0.0054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0321	0.0000		
LA A R 30 cm	0.0003	0.0044	0.0047	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0053	0.0301	0.0000		
LA A R 35 cm	0.0004	0.0046	0.0050	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0007	0.0287	0.0000		
LA A R 40 cm	0.0002	0.0035	0.0037	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0033	0.0306	0.0000		
LA A R 45 cm	0.0004	0.0047	0.0050	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0338	0.0003		
LA A R 50 cm	0.0003	0.0050	0.0053	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0352	0.0000		
LA A R 55 cm	0.0000	0.0070	0.0070	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0400	0.0000		
LA A R 60 cm	0.0000	0.0046	0.0046	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0061	0.0344	0.0000		
LA A R 65 cm	0.0002	0.0045	0.0047	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0276	0.0000		
LA A R 70 cm	0.0002	0.0076	0.0078	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0031	0.0374	0.0000		

Annexe 39 : % massiques normés aux teneurs en Al_2O_3 ,
 profils 06-LA A et LA A R ;
 % massiques normés des différentes particules observées (blanc) ;
 % massiques normés des sommes des particules LC, LCO , DG et éléments figurés ;
 et % massiques normés de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommelCO
06 LA S2 A	0.0023	0.0081	0.0000	0.0182	0.0051	0.0089	0.0333	0.0003	0.0067	0.0023	0.0006	0.0002	0.0100
06 LA S2 20 cm PL	0.0000	0.0163	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0080	0.0014	0.0017	0.0017	0.0152
06 LA S2 25 cm PL	0.0000	0.0107	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0020	0.0053	0.0013	0.0034	0.0007	0.0127
06 LA S2 30 cm PL	0.0000	0.0114	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0061	0.0007	0.0024	0.0005	0.0108
06 LA S2 35 cm PL	0.0007	0.0109	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0023	0.0060	0.0015	0.0016	0.0010	0.0124
06 LA S2 40 cm PL	0.0000	0.0139	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0026	0.0073	0.0018	0.0044	0.0009	0.0170
06 LA S2 45 cm PL	0.0000	0.0117	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0023	0.0077	0.0019	0.0040	0.0012	0.0171
06 LA S2 50 cm PL	0.0000	0.0134	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0042	0.0097	0.0024	0.0033	0.0014	0.0210
06 LA S2 55 cm PL	0.0000	0.0104	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0018	0.0067	0.0012	0.0045	0.0014	0.0156
06 LA S2 60 cm PL	0.0000	0.0137	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0037	0.0096	0.0021	0.0015	0.0021	0.0190
06 LA S2 65 cm PL	0.0000	0.0123	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0031	0.0077	0.0020	0.0033	0.0016	0.0178
06 LA S2 70 cm PL	0.0000	0.0093	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0055	0.0017	0.0021	0.0012	0.0115
06 LA S2 75 cm PL	0.0000	0.0120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0027	0.0079	0.0025	0.0016	0.0016	0.0167
06 LA S2 80 cm PL	0.0000	0.0144	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0032	0.0085	0.0024	0.0014	0.0008	0.0163
06 LA S2 85 cm PL	0.0000	0.0151	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0017	0.0082	0.0005	0.0043	0.0017	0.0163
06 LA S2 90 cm PL	0.0000	0.0117	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0028	0.0097	0.0015	0.0037	0.0012	0.0189
06 LA S2 95 cm PL	0.0000	0.0113	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0047	0.0096	0.0006	0.0030	0.0006	0.0184
06 LA S2 100 cm PL	0.0000	0.0160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0046	0.0114	0.0010	0.0047	0.0012	0.0230
06 LA S2 110 cm PL	0.0000	0.0140	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0044	0.0132	0.0004	0.0033	0.0000	0.0212
06 LA S2 115 cm PL	0.0000	0.0190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0132	0.0035	0.0079	0.0025	0.0306
06 LA S2 120cm PL	0.0000	0.0146	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0021	0.0102	0.0007	0.0021	0.0013	0.0165
06 LA S2 125 cm PL	0.0000	0.0103	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0029	0.0081	0.0002	0.0016	0.0014	0.0143
06 LA S2 135 cm PL	0.0000	0.0146	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0023	0.0094	0.0005	0.0022	0.0024	0.0169
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
06 LA S2 A	0.0004	0.0040	0.0043	0.0030	0.0000	0.0007	0.0038	0.0407	0.0000	0.0224	0.0800		
06 LA S2 20 cm PL	0.0010	0.0071	0.0081	0.0000	0.0002	0.0008	0.0010	0.0000	0.0011	0.0396	0.0010		
06 LA S2 25 cm PL	0.0014	0.0042	0.0055	0.0000	0.0001	0.0005	0.0006	0.0000	0.0010	0.0289	0.0006		
06 LA S2 30 cm PL	0.0011	0.0049	0.0060	0.0000	0.0000	0.0004	0.0004	0.0000	0.0006	0.0282	0.0004		
06 LA S2 35 cm PL	0.0012	0.0049	0.0062	0.0000	0.0000	0.0009	0.0009	0.0000	0.0037	0.0295	0.0015		
06 LA S2 40 cm PL	0.0014	0.0063	0.0077	0.0000	0.0000	0.0010	0.0010	0.0000	0.0055	0.0386	0.0010		
06 LA S2 45 cm PL	0.0016	0.0055	0.0071	0.0000	0.0000	0.0006	0.0006	0.0000	0.0023	0.0359	0.0006		
06 LA S2 50 cm PL	0.0011	0.0062	0.0073	0.0000	0.0000	0.0009	0.0009	0.0000	0.0087	0.0477	0.0009		
06 LA S2 55 cm PL	0.0007	0.0047	0.0054	0.0000	0.0000	0.0009	0.0009	0.0000	0.0024	0.0314	0.0009		
06 LA S2 60 cm PL	0.0014	0.0064	0.0078	0.0000	0.0000	0.0007	0.0007	0.0000	0.0069	0.0405	0.0007		
06 LA S2 65 cm PL	0.0009	0.0053	0.0062	0.0000	0.0000	0.0010	0.0010	0.0000	0.0009	0.0362	0.0010		
06 LA S2 70 cm PL	0.0011	0.0056	0.0067	0.0000	0.0000	0.0007	0.0007	0.0000	0.0036	0.0275	0.0007		
06 LA S2 75 cm PL	0.0010	0.0067	0.0077	0.0000	0.0000	0.0005	0.0005	0.0000	0.0044	0.0363	0.0005		
06 LA S2 80 cm PL	0.0010	0.0052	0.0062	0.0000	0.0000	0.0005	0.0005	0.0000	0.0067	0.0369	0.0005		
06 LA S2 85 cm PL	0.0008	0.0048	0.0056	0.0000	0.0000	0.0007	0.0007	0.0008	0.0090	0.0370	0.0015		
06 LA S2 90 cm PL	0.0009	0.0066	0.0076	0.0000	0.0000	0.0006	0.0006	0.0000	0.0007	0.0381	0.0006		
06 LA S2 95 cm PL	0.0018	0.0075	0.0093	0.0000	0.0000	0.0019	0.0019	0.0000	0.0031	0.0391	0.0019		
06 LA S2 100 cm PL	0.0022	0.0098	0.0120	0.0000	0.0000	0.0005	0.0005	0.0000	0.0050	0.0510	0.0005		
06 LA S2 110 cm PL	0.0046	0.0104	0.0150	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0503	0.0001		
06 LA S2 115 cm PL	0.0014	0.0083	0.0097	0.0000	0.0000	0.0004	0.0004	0.0000	0.0093	0.0593	0.0004		
06 LA S2 120cm PL	0.0009	0.0046	0.0055	0.0000	0.0000	0.0003	0.0003	0.0000	0.0122	0.0366	0.0003		
06 LA S2 125 cm PL	0.0009	0.0076	0.0085	0.0000	0.0000	0.0008	0.0008	0.0000	0.0119	0.0331	0.0008		
06 LA S2 135 cm PL	0.0006	0.0075	0.0081	0.0000	0.0000	0.0002	0.0002	0.0000	0.0159	0.0396	0.0002		

Annexe 40 : % massiques normés aux teneurs en Al_2O_3 ,
profil 06-LA S2 PL ;

% massiques normés des différentes particules observées (blanc) ;
% massiques normés des sommes des particules LC, LCO, DG et éléments figurés ;
et % massiques normés de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LGDS	LGT	somme LC	LCOall	LGOT	LCOc	LCOconco	LCO re	sommelGO
06 LA S2 20 cm TF	0.0056	0.0106	0.0000	0.0000	0.0008	0.0232	0.0239	0.0005	0.0103	0.0000	0.0010	0.0004	0.0123
06 LA S2 25 cm TF	0.0034	0.0070	0.0000	0.0039	0.0006	0.0137	0.0182	0.0019	0.0066	0.0006	0.0005	0.0010	0.0109
06 LA S2 30 cm TF	0.0049	0.0059	0.0000	0.0014	0.0028	0.0098	0.0139	0.0022	0.0090	0.0009	0.0005	0.0012	0.0138
06 LA S2 35 cm TF	0.0017	0.0066	0.0000	0.0088	0.0048	0.0180	0.0316	0.0011	0.0072	0.0002	0.0000	0.0009	0.0093
06 LA S2 40 cm TF	0.0053	0.0149	0.0000	0.0021	0.0015	0.0064	0.0099	0.0034	0.0123	0.0005	0.0006	0.0010	0.0178
06 LA S2 45 cm TF	0.0072	0.0162	0.0000	0.0008	0.0055	0.0112	0.0174	0.0071	0.0158	0.0017	0.0009	0.0005	0.0260
06 LA S2 50 cm TF	0.0025	0.0143	0.0000	0.0046	0.0009	0.0094	0.0149	0.0035	0.0137	0.0005	0.0015	0.0010	0.0201
06 LA S2 55 cm TF	0.0023	0.0147	0.0000	0.0026	0.0004	0.0026	0.0056	0.0009	0.0103	0.0003	0.0019	0.0008	0.0152
06 LA S2 60 cm TF	0.0006	0.0154	0.0000	0.0000	0.0005	0.0113	0.0118	0.0019	0.0130	0.0020	0.0020	0.0023	0.0213
06 LA S2 65 cm TF	0.0002	0.0145	0.0000	0.0000	0.0014	0.0038	0.0052	0.0025	0.0128	0.0024	0.0015	0.0018	0.0209
06 LA S2 70 cm TF	0.0014	0.0102	0.0000	0.0000	0.0012	0.0039	0.0050	0.0054	0.0127	0.0014	0.0003	0.0023	0.0221
06 LA S2 75 cm TF	0.0007	0.0158	0.0000	0.0008	0.0000	0.0020	0.0028	0.0033	0.0139	0.0013	0.0016	0.0058	0.0259
06 LA S2 80 cm TF	0.0015	0.0133	0.0000	0.0004	0.0003	0.0040	0.0047	0.0032	0.0162	0.0016	0.0015	0.0000	0.0226
06 LA S2 85 cm TF	0.0000	0.0097	0.0000	0.0000	0.0001	0.0044	0.0045	0.0034	0.0116	0.0016	0.0017	0.0000	0.0184
06 LA S2 90 cm TF	0.0001	0.0144	0.0000	0.0006	0.0005	0.0041	0.0051	0.0018	0.0135	0.0008	0.0023	0.0000	0.0185
06 LA S2 95 cm TF	0.0019	0.0112	0.0000	0.0030	0.0002	0.0028	0.0060	0.0035	0.0133	0.0048	0.0024	0.0000	0.0241
06 LA S2 100 cm TF	0.0011	0.0130	0.0000	0.0006	0.0000	0.0016	0.0022	0.0019	0.0143	0.0029	0.0015	0.0017	0.0223
06 LA S2 110 cm TF	0.0004	0.0214	0.0000	0.0031	0.0003	0.0007	0.0041	0.0040	0.0233	0.0019	0.0031	0.0017	0.0341
06 LA S2 115 cm TF	0.0007	0.0084	0.0000	0.0020	0.0001	0.0004	0.0025	0.0035	0.0106	0.0022	0.0019	0.0000	0.0181
06 LA S2 120cm TF	0.0000	0.0141	0.0000	0.0018	0.0000	0.0011	0.0029	0.0058	0.0164	0.0019	0.0003	0.0000	0.0244
06 LA S2 125 cm TF	0.0000	0.0117	0.0000	0.0003	0.0000	0.0004	0.0007	0.0036	0.0124	0.0025	0.0012	0.0007	0.0204
06 LA S2 135 cm TF	0.0005	0.0107	0.0000	0.0010	0.0000	0.0003	0.0013	0.0034	0.0140	0.0012	0.0011	0.0006	0.0202
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
06 LA S2 20 cm TF	0.0005	0.0033	0.0038	0.0068	0.0007	0.0000	0.0075	0.0100	0.0021	0.0286	0.0471		
06 LA S2 25 cm TF	0.0003	0.0037	0.0040	0.0060	0.0016	0.0010	0.0085	0.0279	0.0000	0.0218	0.0580		
06 LA S2 30 cm TF	0.0003	0.0035	0.0037	0.0038	0.0017	0.0001	0.0056	0.0240	0.0000	0.0234	0.0484		
06 LA S2 35 cm TF	0.0000	0.0028	0.0028	0.0062	0.0006	0.0000	0.0068	0.0076	0.0000	0.0187	0.0477		
06 LA S2 40 cm TF	0.0000	0.0042	0.0042	0.0070	0.0024	0.0000	0.0095	0.0137	0.0000	0.0369	0.0384		
06 LA S2 45 cm TF	0.0000	0.0054	0.0054	0.0042	0.0026	0.0069	0.0137	0.0107	0.0000	0.0476	0.0490		
06 LA S2 50 cm TF	0.0003	0.0038	0.0041	0.0055	0.0022	0.0000	0.0077	0.0094	0.0000	0.0386	0.0344		
06 LA S2 55 cm TF	0.0018	0.0059	0.0077	0.0018	0.0008	0.0000	0.0027	0.0026	0.0003	0.0376	0.0131		
06 LA S2 60 cm TF	0.0003	0.0067	0.0070	0.0007	0.0082	0.0005	0.0094	0.0020	0.0016	0.0446	0.0239		
06 LA S2 65 cm TF	0.0005	0.0036	0.0041	0.0000	0.0003	0.0002	0.0004	0.0083	0.0000	0.0395	0.0141		
06 LA S2 70 cm TF	0.0003	0.0060	0.0063	0.0004	0.0004	0.0005	0.0013	0.0018	0.0015	0.0385	0.0095		
06 LA S2 75 cm TF	0.0003	0.0059	0.0062	0.0016	0.0026	0.0000	0.0042	0.0052	0.0000	0.0479	0.0129		
06 LA S2 80 cm TF	0.0005	0.0057	0.0063	0.0007	0.0001	0.0000	0.0008	0.0041	0.0000	0.0422	0.0112		
06 LA S2 85 cm TF	0.0001	0.0035	0.0036	0.0022	0.0004	0.0000	0.0026	0.0019	0.0005	0.0316	0.0089		
06 LA S2 90 cm TF	0.0007	0.0066	0.0072	0.0009	0.0005	0.0016	0.0030	0.0017	0.0000	0.0401	0.0100		
06 LA S2 95 cm TF	0.0013	0.0074	0.0087	0.0013	0.0005	0.0012	0.0029	0.0039	0.0000	0.0440	0.0146		
06 LA S2 100 cm TF	0.0013	0.0088	0.0101	0.0004	0.0000	0.0000	0.0004	0.0013	0.0009	0.0454	0.0049		
06 LA S2 110 cm TF	0.0012	0.0113	0.0125	0.0010	0.0012	0.0026	0.0047	0.0064	0.0011	0.0679	0.0158		
06 LA S2 115 cm TF	0.0003	0.0056	0.0059	0.0005	0.0009	0.0005	0.0020	0.0035	0.0000	0.0324	0.0087		
06 LA S2 120cm TF	0.0011	0.0083	0.0094	0.0000	0.0005	0.0002	0.0007	0.0057	0.0009	0.0480	0.0093		
06 LA S2 125 cm TF	0.0007	0.0059	0.0066	0.0006	0.0001	0.0002	0.0010	0.0013	0.0000	0.0387	0.0029		
06 LA S2 135 cm TF	0.0005	0.0070	0.0075	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.0013	0.0000	0.0384	0.0031		

Annexe 41 : % massiques normés aux teneurs en Al_2O_3 ,
profil 06-LA S2 TF ;

% massiques normés des différentes particules observées (blanc) ;

% massiques normés des sommes des particules LC, LCO , DG et éléments figurés ;
et % massiques normés de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCot	LCOc	LCOconco	LCO re	sommelCO
Laval MES 12/07/2006a	0.0018	0.0134	0.0000	0.0004	0.0003	0.0000	0.0007	0.0011	0.0114	0.0009	0.0002	0.0001	0.0137
Laval MES 08/09/2006	0.0000	0.0165	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0002	0.0032	0.0175	0.0010	0.0016	0.0022	0.0254
Laval MES 25/09/2006	0.0002	0.0200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0009	0.0184	0.0013	0.0031	0.0034	0.0271
Laval MES 20/10/2006a	0.0002	0.0136	0.0000	0.0012	0.0000	0.0005	0.0017	0.0015	0.0124	0.0011	0.0002	0.0002	0.0154
Laval MES 07/12/2006a	0.0000	0.0208	0.0000	0.0003	0.0022	0.0026	0.0050	0.0027	0.0160	0.0016	0.0000	0.0026	0.0229
Laval MES 05/06/2007a	0.0000	0.0147	0.0000	0.0000	0.0012	0.0000	0.0012	0.0021	0.0110	0.0012	0.0021	0.0010	0.0174
Laval MES 22/11/2007	0.0000	0.0144	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0160	0.0044	0.0000	0.0020	0.0230
Laval MES 11/01/2008a	0.0000	0.0163	0.0000	0.0000	0.0026	0.0000	0.0026	0.0023	0.0161	0.0019	0.0000	0.0012	0.0214
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
Laval MES 12/07/2006a	0.0003	0.0035	0.0038	0.0003	0.0002	0.0002	0.0007	0.0026	0.0083	0.0308	0.0059		
Laval MES 08/09/2006	0.0000	0.0037	0.0037	0.0003	0.0000	0.0000	0.0003	0.0051	0.0065	0.0456	0.0056		
Laval MES 25/09/2006	0.0006	0.0035	0.0041	0.0003	0.0000	0.0000	0.0003	0.0031	0.0089	0.0513	0.0036		
Laval MES 20/10/2006a	0.0004	0.0042	0.0046	0.0008	0.0000	0.0006	0.0014	0.0031	0.0022	0.0336	0.0064		
Laval MES 07/12/2006a	0.0000	0.0036	0.0036	0.0004	0.0000	0.0002	0.0006	0.0032	0.0166	0.0473	0.0088		
Laval MES 05/06/2007a	0.0003	0.0030	0.0032	0.0010	0.0003	0.0000	0.0012	0.0028	0.0225	0.0353	0.0053		
Laval MES 22/11/2007	0.0004	0.0038	0.0043	0.0016	0.0005	0.0000	0.0021	0.0031	0.0212	0.0416	0.0052		
Laval MES 11/01/2008a	0.0001	0.0028	0.0029	0.0000	0.0000	0.0003	0.0003	0.0026	0.0126	0.0407	0.0055		

Annexe 42 : % massiques normés aux teneurs en Al_2O_3 ,
particules fluviatiles du Laval ;
% massiques normés des différentes particules observées (blanc) ;
% massiques normés des sommes des particules LC, LCO , DG et éléments figurés ;
et % massiques normés de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommelCO
06 BRU S1 A 0 cm	0.0173	0.0121	0.0028	0.0022	0.0430	0.0005	0.0456	0.0045	0.0189	0.0007	0.0000	0.0126	0.0367
06 BRU S1 A 5 cm	0.0117	0.0124	0.0016	0.0000	0.0206	0.0004	0.0211	0.0008	0.0119	0.0006	0.0000	0.0012	0.0145
06 BRU S1 A 10 cm	0.0059	0.0186	0.0011	0.0010	0.0080	0.0006	0.0096	0.0010	0.0139	0.0055	0.0007	0.0053	0.0264
06 BRU S1 A 15 cm	0.0031	0.0067	0.0031	0.0010	0.0016	0.0000	0.0016	0.0018	0.0109	0.0052	0.0002	0.0050	0.0231
06 BRU S1 PL 20 cm	0.0000	0.0143	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0061	0.0096	0.0027	0.0014	0.0021	0.0219
06 BRU S1 PL 25 cm	0.0006	0.0138	0.0022	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008	0.0098	0.0007	0.0000	0.0071	0.0184
06 BRU S1 PL 30 cm	0.0006	0.0178	0.0010	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0013	0.0156	0.0019	0.0009	0.0098	0.0296
06 BRU S1 PL 35 cm	0.0000	0.0196	0.0019	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0016	0.0143	0.0031	0.0012	0.0077	0.0280
06 BRU S1 PL 40 cm	0.0000	0.0172	0.0021	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0021	0.0131	0.0000	0.0000	0.0051	0.0203
06 BRU S1 PL 45 cm	0.0000	0.0172	0.0340	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0058	0.0135	0.0062	0.0019	0.0000	0.0275
06 BRU S1 PL 50 cm	0.0000	0.0127	0.0426	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0049	0.0113	0.0043	0.0026	0.0000	0.0230
06 BRU S1 PL 55 cm	0.0000	0.0137	0.0288	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0072	0.0102	0.0018	0.0000	0.0000	0.0192
06 BRU S1 PL 60 cm	0.0004	0.0256	0.0225	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0073	0.0086	0.0042	0.0005	0.0000	0.0206
06 BRU S1 PL 65 cm	0.0008	0.0267	0.0207	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0069	0.0134	0.0011	0.0032	0.0028	0.0273
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommelCO
06 BRU S1 TF 20 cm	0.0021	0.0093	0.0038	0.0000	0.0030	0.0000	0.0030	0.0035	0.0141	0.0018	0.0000	0.0000	0.0194
06 BRU S1 TF 25 cm	0.0023	0.0103	0.0042	0.0000	0.0026	0.0000	0.0026	0.0023	0.0152	0.0016	0.0000	0.0000	0.0193
06 BRU S1 TF 35 cm	0.0022	0.0115	0.0039	0.0000	0.0028	0.0000	0.0028	0.0047	0.0167	0.0016	0.0000	0.0000	0.0229
06 BRU S1 TF 40 cm	0.0023	0.0152	0.0056	0.0000	0.0021	0.0000	0.0021	0.0054	0.0099	0.0034	0.0010	0.0000	0.0197
06 BRU S1 TF 50 cm	0.0018	0.0120	0.0346	0.0000	0.0034	0.0000	0.0034	0.0055	0.0099	0.0055	0.0040	0.0000	0.0249
06 BRU S1 TF 65 cm	0.0006	0.0174	0.0223	0.0009	0.0037	0.0000	0.0045	0.0064	0.0129	0.0076	0.0004	0.0000	0.0274
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
06 BRU S1 A 0 cm	0.0000	0.0029	0.0029	0.0292	0.0008	0.0046	0.0346	0.1127	0.0045	0.0544	0.2103		
06 BRU S1 A 5 cm	0.0000	0.0013	0.0013	0.0103	0.0017	0.0000	0.0120	0.1413	0.0017	0.0299	0.1860		
06 BRU S1 A 10 cm	0.0002	0.0025	0.0027	0.0101	0.0026	0.0110	0.0237	0.0204	0.0000	0.0487	0.0596		
06 BRU S1 A 15 cm	0.0003	0.0032	0.0035	0.0022	0.0016	0.0000	0.0038	0.0000	0.0029	0.0365	0.0085		
06 BRU S1 PL 20 cm	0.0007	0.0055	0.0061	0.0000	0.0006	0.0000	0.0006	0.0000	0.0022	0.0441	0.0006		
06 BRU S1 PL 25 cm	0.0012	0.0054	0.0076	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0420	0.0006		
06 BRU S1 PL 30 cm	0.0010	0.0053	0.0063	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0080	0.0547	0.0006		
06 BRU S1 PL 35 cm	0.0004	0.0055	0.0058	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0039	0.0553	0.0000		
06 BRU S1 PL 40 cm	0.0004	0.0075	0.0079	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0475	0.0000		
06 BRU S1 PL 45 cm	0.0000	0.0005	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0075	0.0791	0.0000		
06 BRU S1 PL 50 cm	0.0000	0.0003	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0057	0.0786	0.0000		
06 BRU S1 PL 55 cm	0.0000	0.0005	0.0005	0.0000	0.0039	0.0000	0.0039	0.0000	0.0054	0.0621	0.0039		
06 BRU S1 PL 60 cm	0.0001	0.0005	0.0006	0.0000	0.0014	0.0000	0.0014	0.0000	0.0192	0.0692	0.0018		
06 BRU S1 PL 65 cm	0.0004	0.0002	0.0005	0.0000	0.0071	0.0000	0.0071	0.0000	0.0038	0.0752	0.0079		
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
06 BRU S1 TF 20 cm	0.0000	0.0019	0.0019	0.0020	0.0017	0.0000	0.0038	0.0117	0.0006	0.0344	0.0206		
06 BRU S1 TF 25 cm	0.0000	0.0024	0.0024	0.0015	0.0022	0.0000	0.0037	0.0121	0.0011	0.0360	0.0206		
06 BRU S1 TF 35 cm	0.0003	0.0023	0.0026	0.0029	0.0005	0.0000	0.0034	0.0148	0.0011	0.0409	0.0233		
06 BRU S1 TF 40 cm	0.0002	0.0025	0.0027	0.0013	0.0008	0.0000	0.0021	0.0063	0.0027	0.0431	0.0127		
06 BRU S1 TF 50 cm	0.0000	0.0005	0.0005	0.0044	0.0013	0.0000	0.0058	0.0076	0.0042	0.0720	0.0185		
06 BRU S1 TF 65 cm	0.0000	0.0009	0.0009	0.0005	0.0033	0.0000	0.0038	0.0046	0.0122	0.0680	0.0135		

Annexe 43 : % massiques normés aux teneurs en Al_2O_3 ,
profil 06-BRU S1 ;

% massiques normés des différentes particules observées (blanc) ;

% massiques normés des sommes des particules LC, LCO , DG et éléments figurés ;
et % massiques normés de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	somme LCO
BRU S1 Lat surface	0.0000	0.0312	0.0298	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0071	0.0247	0.0043	0.0031	0.0000	0.0391
BRU S1 Lat 10	0.0000	0.0348	0.0334	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0073	0.0144	0.0008	0.0014	0.0043	0.0282
BRU S1 Lat 30	0.0000	0.0291	0.0369	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0061	0.0074	0.0040	0.0020	0.0000	0.0196
BRU S1 Lat 40	0.0000	0.0376	0.0292	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0059	0.0103	0.0000	0.0010	0.0000	0.0171
BRU S1 Lat 50	0.0000	0.0298	0.0286	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0060	0.0085	0.0017	0.0035	0.0000	0.0197
BRU S1 Lat 60	0.0000	0.0486	0.0318	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0065	0.0172	0.0043	0.0014	0.0000	0.0295
BRU S1 Lat	0.0000	0.0182	0.0414	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0078	0.0094	0.0044	0.0009	0.0000	0.0225
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
BRU S1 Lat surface	0.0000	0.0015	0.0015	0.0000	0.0022	0.0000	0.0022	0.0000	0.0026	0.1017	0.0022		
BRU S1 Lat	0.0000	0.0005	0.0005	0.0000	0.0014	0.0000	0.0014	0.0000	0.0074	0.0969	0.0014		
BRU S1 Lat	0.0000	0.0007	0.0007	0.0000	0.0004	0.0000	0.0004	0.0000	0.0031	0.0863	0.0004		
BRU S1 Lat	0.0000	0.0013	0.0013	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0018	0.0852	0.0000		
BRU S1 Lat	0.0000	0.0003	0.0003	0.0000	0.0010	0.0000	0.0010	0.0000	0.0072	0.0785	0.0010		
BRU S1 Lat	0.0000	0.0009	0.0009	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0060	0.1107	0.0000		
BRU S1 Lat	0.0000	0.0002	0.0002	0.0000	0.0053	0.0000	0.0053	0.0000	0.0104	0.0823	0.0053		

Annexe 44 : % massiques normés aux teneurs en Al_2O_3 ,
profil BRU S1 Lat ;
% massiques normés des différentes particules observées (blanc) ;
% massiques normés des sommes des particules LC, LCO , DG et éléments figurés ;
et % massiques normés de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
06 BRU S3 PL 0 cm	0.0000	0.0232	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0041	0.0160	0.0025	0.0014	0.0007	0.0248
06 BRU S3 PL 5 cm	0.0000	0.0193	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0031	0.0195	0.0000	0.0034	0.0000	0.0260
06 BRU S3 PL 10 cm	0.0000	0.0192	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0037	0.0182	0.0006	0.0000	0.0004	0.0269
06 BRU S3 PL 15 cm	0.0000	0.0211	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0038	0.0239	0.0008	0.0000	0.0000	0.0285
06 BRU S3 PL 20 cm	0.0000	0.0160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0037	0.0208	0.0047	0.0011	0.0016	0.0318
06 BRU S3 PL 25 cm	0.0000	0.0181	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0050	0.0209	0.0000	0.0016	0.0000	0.0275
06 BRU S3 PL 30 cm	0.0000	0.0235	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0095	0.0214	0.0006	0.0009	0.0012	0.0336
06 BRU S3 PL 45 cm	0.0000	0.0160	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0058	0.0201	0.0010	0.0019	0.0014	0.0302
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
06 BRU S3 TF 0 cm	0.0040	0.0242	0.0000	0.0000	0.0222	0.0042	0.0264	0.0000	0.0210	0.0014	0.0000	0.0013	0.0237
06 BRU S3 TF 5 cm	0.0063	0.0250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0059	0.0059	0.0042	0.0195	0.0014	0.0000	0.0016	0.0268
06 BRU S3 TF 10 cm	0.0000	0.0174	0.0000	0.0000	0.0119	0.0069	0.0188	0.0037	0.0169	0.0028	0.0014	0.0008	0.0256
06 BRU S3 TF 15 cm	0.0049	0.0178	0.0000	0.0000	0.0203	0.0142	0.0344	0.0038	0.0197	0.0002	0.0007	0.0006	0.0250
06 BRU S3 TF 20 cm	0.0030	0.0168	0.0000	0.0000	0.0132	0.0024	0.0155	0.0057	0.0174	0.0011	0.0035	0.0010	0.0287
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommeLCO
BRU S3 Lat A 0 cm	0.0000	0.0155	0.0000	0.0302	0.1378	0.0202	0.1882	0.0018	0.0112	0.0000	0.0009	0.0036	0.0175
BRU S3 Lat A 5 cm	0.0043	0.0118	0.0000	0.0000	0.0041	0.0103	0.0145	0.0025	0.0174	0.0000	0.0000	0.0000	0.0199
BRU S3 Lat PL 10 cm	0.0000	0.0304	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0063	0.0119	0.0008	0.0012	0.0017	0.0218
BRU S3 Lat PL 20 cm	0.0000	0.0258	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0021	0.0132	0.0008	0.0024	0.0009	0.0194
BRU S3 Lat PL 30 cm	0.0000	0.0220	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0047	0.0162	0.0057	0.0000	0.0022	0.0287
BRU S3 Lat PL 40 cm	0.0000	0.0201	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0029	0.0167	0.0006	0.0000	0.0012	0.0214
BRU S3 Lat PL 50 cm	0.0000	0.0153	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0065	0.0191	0.0016	0.0008	0.0017	0.0297
BRU S3 Lat PL 60 cm	0.0000	0.0138	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0021	0.0211	0.0041	0.0015	0.0006	0.0293
BRU S3 Lat PL 700 cm	0.0000	0.0165	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0025	0.0222	0.0023	0.0009	0.0013	0.0292
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
06 BRU S3 PL 0 cm	0.0000	0.0035	0.0035	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0041	0.0514	0.0000		
06 BRU S3 PL 5 cm	0.0000	0.0033	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0022	0.0486	0.0000		
06 BRU S3 PL 10 cm	0.0000	0.0022	0.0022	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0042	0.0483	0.0000		
06 BRU S3 PL 15 cm	0.0000	0.0040	0.0040	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0045	0.0536	0.0000		
06 BRU S3 PL 20 cm	0.0004	0.0041	0.0045	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0044	0.0522	0.0000		
06 BRU S3 PL 25 cm	0.0003	0.0040	0.0043	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0027	0.0499	0.0000		
06 BRU S3 PL 30 cm	0.0000	0.0043	0.0043	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	0.0614	0.0000		
06 BRU S3 PL 45 cm	0.0003	0.0041	0.0044	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0096	0.0507	0.0000		
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
06 BRU S3 TF 0 cm	0.0000	0.0011	0.0011	0.0084	0.0000	0.0042	0.0126	0.0310	0.0015	0.0491	0.0739		
06 BRU S3 TF 5 cm	0.0000	0.0024	0.0024	0.0069	0.0000	0.0000	0.0069	0.0458	0.0000	0.0541	0.0649		
06 BRU S3 TF 10 cm	0.0003	0.0015	0.0018	0.0042	0.0000	0.0000	0.0042	0.0587	0.0012	0.0447	0.0817		
06 BRU S3 TF 15 cm	0.0000	0.0005	0.0005	0.0065	0.0018	0.0039	0.0122	0.0525	0.0011	0.0432	0.1040		
06 BRU S3 TF 20 cm	0.0000	0.0013	0.0013	0.0047	0.0012	0.0000	0.0059	0.0320	0.0048	0.0468	0.0564		
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
BRU S3 Lat A 0 cm	0.0000	0.0016	0.0016	0.0199	0.0022	0.0000	0.0221	0.2314	0.0000	0.0347	0.4418		
BRU S3 Lat A 5 cm	0.0000	0.0027	0.0027	0.0067	0.0000	0.0000	0.0067	0.0288	0.0067	0.0345	0.0542		
BRU S3 Lat PL 10 cm	0.0000	0.0023	0.0023	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0545	0.0000		
BRU S3 Lat PL 20 cm	0.0004	0.0049	0.0054	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0111	0.0506	0.0000		
BRU S3 Lat PL 30 cm	0.0000	0.0045	0.0045	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0017	0.0553	0.0000		
BRU S3 Lat PL 40 cm	0.0000	0.0015	0.0015	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0060	0.0431	0.0000		
BRU S3 Lat PL 50 cm	0.0000	0.0025	0.0025	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0183	0.0475	0.0000		
BRU S3 Lat PL 60 cm	0.0000	0.0076	0.0076	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0508	0.0000		
BRU S3 Lat PL 700 cm	0.0000	0.0027	0.0027	0.0000	0.0000	0.0004	0.0004	0.0000	0.0108	0.0484	0.0004		

Annexe 45 : % massiques normés aux teneurs en Al_2O_3 ,
 profils 06-BRUS S3 et BRU S3 Lat ;
 % massiques normés des différentes particules observées (blanc) ;
 % massiques normés des sommes des particules LC, LCO, DG et éléments figurés ;
 et % massiques normés de la MOF et MOR (gris).

Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommelCO
Brusquet MES 12/07/2006b	0.000	0.013	0.005	0.001	0.001	0.001	0.003	0.009	0.019	0.002	0.001	0.002	0.034
Brusquet MES 24/09/2006	0.001	0.008	0.006	0.002	0.007	0.003	0.012	0.002	0.018	0.004	0.002	0.001	0.026
Echantillons	MOAgc	MOAr	MOAO	LCDs	LCDG	LCT	somme LC	LCOall	LCOt	LCOc	LCOconco	LCO re	sommelCO
MES Moulin 08/09/2006a	0.000	0.016	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.014	0.002	0.003	0.001	0.022
MES Moulin 24/09/2006	0.001	0.016	0.000	0.000	0.001	0.003	0.004	0.005	0.010	0.002	0.002	0.001	0.019
MES Moulin 20/10/2006a	0.000	0.020	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.003	0.015	0.004	0.002	0.000	0.024
MES Moulin 07/12/2006	0.000	0.021	0.000	0.000	0.002	0.004	0.006	0.003	0.016	0.002	0.000	0.003	0.024
MES Moulin 05/06/2007a	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.004	0.011	0.004	0.001	0.001	0.021
MES Moulin 23/11/2007	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.012	0.002	0.000	0.001	0.018
MES Moulin 12/01/2008a	0.000	0.020	0.000	0.000	0.003	0.000	0.003	0.003	0.019	0.002	0.000	0.001	0.025
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
Brusquet MES 12/07/2006b	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.010	0.005	0.054	0.014		
Brusquet MES 24/09/2006	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.003	0.005	0.017	0.005	0.042	0.035		
Echantillons	DG	DGO	somme DG	myc	SO PO	mbr	éléments figurés	AG	pyrite	MOF	MOR		
MES Moulin 08/09/2006a	0.000	0.003	0.003	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.007	0.041	0.005		
MES Moulin 24/09/2006	0.000	0.003	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.009	0.039	0.007		
MES Moulin 20/10/2006a	0.000	0.005	0.005	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.016	0.048	0.003		
MES Moulin 07/12/2006	0.000	0.004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.017	0.049	0.010		
MES Moulin 05/06/2007a	0.001	0.006	0.007	0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.019	0.040	0.005		
MES Moulin 23/11/2007	0.000	0.004	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004	0.037	0.006		
MES Moulin 12/01/2008a	0.000	0.003	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.015	0.048	0.006		






Annexe 46 : % massiques normés aux teneurs en Al_2O_3 ,
MES du Brusquet et du Moulin ;
% massiques normés des différentes particules observées (blanc) ;
% massiques normés des sommes des particules LC, LCO, DG et éléments figurés ;
et % massiques normés de la MOF et MOR (gris).

Abréviations, sigles et acronymes utilisés dans ce travail :




Corg : Carbone organique
COF : Carbone Organique Fossile
COR : Carbone Organique Récent
COP : Carbone Organique Particulaire
COD : Carbone Organique Dissous
MO : Matière Organique
MOF : Matière Organique Fossile
MOR : Matière Organique Récente
COT : Carbone Organique Total
IH : Indice d'hydrogène
IO : Indice d'Oxygène
MET : Microscopie Electronique en Transmission
ICP : Spectrométrie d'émission Plasma à Couplage Inductif
GC-MS : Couplage chromatographie et spectrométrie de masse
PNA : % massiques normés aux teneurs en Al_2O_3
Echantillons PL : Plaquettes de marnes non altérées
Echantillons TF : Terres Fines argileuses issues de l'altération des roches
MES : Matières En Suspension
CF : Charges de Fond

Particules organiques





particules opaques (LCO)

-  LCOal : débris ligno-cellulosiques opaques de formes allongés
-  LCOconc : débris ligno-cellulosiques opaques de formes conchoïdales
-  LCOc : débris ligno-cellulosiques opaques de formes complexes
-  LCOtr : débris ligno-cellulosiques opaques de formes trapues
-  LCOr : débris ligno-cellulosiques opaques présentant un éclat brillant en lumière réfléchie


débris ligno-cellulosiques (LC)

-  LCT : débris ligno-cellulosiques translucides
-  LCDs : débris ligno-cellulosiques dégradés sombres
-  LCGD: débris ligno-cellulosiques dégradés et gélifiés





particules amorphes

-  MOAr : matières organiques amorphes rougeâtres
-  AG : matières organiques amorphes gélifiées
-  MOAgc : matières organiques amorphes granulaires claires
-  MOAO : matières organiques amorphes opaques

débris gélifiés (DG)

-  DG : débris gélifiés transparents
-  DGO : débris gélifiés sombres

éléments figurés

-  Myc : filaments mycéliens
-  SO-PO : spores et pollens
-  Mbr : fragments de cuticules
-  pyrite

Production et devenir du carbone organique fossile libéré par les altérations mécaniques et chimiques des formations marneuses : exemple des « terres noires » des bassins versants expérimentaux de Draix (Alpes de haute Provence, France)

La contribution, dans le cycle supergène, du carbone organique fossile (COF), issu de l'érosion des roches sédimentaires, est aujourd'hui une inconnue majeure du cycle du carbone.

Le présent travail, initié dans le cadre du GIS Draix "étude de l'érosion en montagne », s'est intéressé au devenir de la matière organique contenue dans les "terres noires" (marnes jurassiques) des bassins versants de Draix (Alpes de haute Provence, France). Ceci a nécessité :

- la mise en évidence de la contribution de COF au sein des compartiments supergènes (sols, particules fluviales, altérites) à travers une approche pluri-analytique (investigations géochimiques, optiques, isotopiques).
- l'estimation de la part de COF disparue lors de son transfert d'un compartiment à un autre obtenue grâce au développement d'une nouvelle méthode analytique (palynofacies quantitatif) et en couplant approches terrain et expérimentale.
- l'estimation et la modélisation des flux de COF libérés par les altérations mécaniques et chimiques des terres noires à l'échelle des bassins étudiés.

Les résultats obtenus permettent : - 1) de confirmer la résistance du COF, dont les pertes n'excèdent pas 30 % et ne concernent que la part libérée par l'altération chimique; - 2) de rappeler la pluralité du COF, dont les familles réagissent différemment face aux différents types d'altérations ; - 3) de hiérarchiser les facteurs contrôlant les flux de COF (couvert végétal, pentes, précipitations) ; - 4) de mettre en évidence l'importance du COF libéré, exprimé en t/ha/an, par les « terres noires » aux échelles locales et régionales.

Mots clefs : carbone organique fossile, cycle du carbone, bassins versants expérimentaux, marnes, érosions mécanique et chimique, modélisation, GIS "Draix"

Production and fate of fossil organic carbon released by mechanical and chemical weathering of marly formations: Jurassic marls of Draix experimental watersheds, France.

Initiated within the framework of GIS Draix « mountains erosion study), this work relates to the debate on the fossil organic carbon (FOC) input in modern environments and its possible implications for the carbon cycle. It focuses on the fate of FOC released by of jurassic marls weathering occuring in Draix watersheds (Alpes de haute Provence, France). Such work needed to :

- confirm FOC occurrence both in weathered rocks, soils and riverine particles (multi-analytical approach);
- quantify FOC losses during pools transitions by using a new analytical method (quantitative palynofacies) and combining field and experimental investigations;
- estimate and model FOC fluxes released both by chemical and mechanical weathering in the studied watersheds.

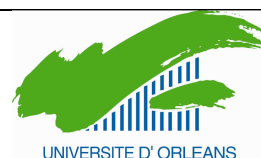
Obtained results permit us to :

- point out FOC resistance to weathering processes. FOC losses only occur during chemical one and do not exceed 30 %.
- highlight fossil organic matter plurality composed with labile and refractory components ;
- hierarchize fluxes controlling factors such as vegetal cover, slope, and precipitations ;
- emphasize FOC fluxes importance, expressed in t/ha/y, released by jurassic marls weathering at local and regional scales.

Keywords : fossil organic carbon, carbon cycle, experimental watersheds, marls, mechanical and chemical weathering, modelling, GIS "Draix "



Institut des Sciences de la Terre d'Orléans
1A, rue de la Férollerie, 45071 Orléans CEDEX 2 France



GIS Draix

2 rue de la Papeterie BP 76 38402 St-Martin-d'Heres, France

